

**Génération et dispersion de résidus miniers :
Développement d'outils de télédétection en infrarouge proche**

par

Emrik Dauphinais

mémoire présenté au Département de chimie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke (Québec), Canada

Août 2020

Le 28 août 2020

*le jury a accepté le mémoire de Monsieur Emrik Dauphinais
dans sa version finale.*

Membres du jury

Professeur Patrick Ayotte
Directeur de recherche
Département de chimie

Professeur Pedro Alejandro Segura
Membre interne
Département de chimie

Professeur Jean-Philippe Bellenger
Président-rapporteur
Département de chimie

Sommaire

Principal producteur d'alumine du Saguenay, l'usine Vaudreuil de Rio Tinto Alcan doit voir à l'entreposage des sous-produits : les résidus de bauxite ou les « boues rouges ». À ciel ouvert, le risque d'emportement indésirable de poussières fugitives varie selon les conditions environnementales. Donc, la gestion du site de disposition des résidus nécessite des moyens pour détecter et prévenir de tels emportements.

Dans cette optique, l'albédo des résidus de bauxite et de la neige a été étudié. Les objectifs sont la détermination des taux d'humidité de surface des résidus de bauxite et de leur teneur dans la neige.

La caractérisation des échantillons en laboratoire et la validation des méthodes optiques au site de disposition permettent d'envisager des méthodes de télédétection. De plus, elles permettraient de mieux appréhender et prédire l'évaporation des boues et de déployer des méthodes de mitigation avant qu'elles n'atteignent le taux de siccité critique propice à leur emportement.

Les travaux permettront de construire et de supporter des modèles prédictifs des risques d'emportement de poussières en fonction des conditions météorologiques et de l'état d'assèchement de la surface des résidus. Enfin, dans le futur, nous espérons explorer l'utilisation d'outils de télédétection, par des drones ou des satellites, capables de mesurer l'albédo des sols et de la neige. Corroborés à des capteurs environnementaux autonomes, les emportements pourraient être liés à des événements météorologiques.

Mots clés : Albédo, Environnement, Infrarouge, Neige, Poussières fugitives, Résidus de bauxite, Télédétection.

Remerciements

D’abord, j’aimerais remercier sincèrement le professeur Patrick Ayotte pour son accueil et ses précieux conseils.

Je suis reconnaissant à mes collègues pour leur compagnie et pour l’aide qu’ils ont apportée au projet. Je pense à Josée, Jonathan, Isabelle, Sarah, Clément, Francis, Jean-Claude ainsi qu’aux stagiaires, Céline, Etienne, Joanick et Olivier, qui ont chacun apporté leur brique à la construction de ce projet.

Merci à nos associés du département de géomatique, Patrick Cliche et Étienne Morin, qui m’ont patiemment montré l’utilisation de leurs instruments.

Je salue le dévouement du personnel de l’usine Vaudreuil au Saguenay qui a toujours été à l’écoute de nos idées et qui a grandement contribué à la réussite de nos démarches.

Je remercie de tout cœur ma famille et mes amis proches pour leur support. Tout ce travail a été rendu possible grâce à eux !

Finalement, merci à Rio Tinto Alcan pour leur précieuse collaboration ainsi qu’à *Énergie et Ressources naturelles Québec*, aux *Fonds de recherche Nature et technologies Québec* et à la faculté des sciences de l’Université Sherbrooke pour leur support financier.

Table des matières

Sommaire	iii
Remerciements	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction	1
1 Théorie	6
1.1 Définition de l'albédo	6
1.2 Caractéristiques des résidus de bauxite	9
1.3 Spectroscopie infrarouge de l'eau	13
1.4 Concepts d'optique	16
1.4.1 Réflexion selon Fresnel	17
1.4.2 Absorbance selon Beer-Lambert	20
1.4.3 Diffusion selon Rayleigh et le modèle de Mie	22
2 Méthodologie	27
2.1 Mesures expérimentales de l'albédo avec un spectroradiomètre <i>Analytical Spectral Device</i> (ASD)	27
2.2 Préparation des échantillons de laboratoire à partir des résidus de bauxite	31

2.3	Modèle TARTES (<i>Two-streAm Radiative TransfEr in Snow model</i>)	35
3	Détermination des taux de siccité dans les résidus de bauxite	38
3.1	Analyse spectroscopique des résidus de bauxite humides	38
3.2	Analyse spectroscopique des résidus de bauxite congelés	45
3.2.1	Informations spectroscopiques complémentaires révélant la morphologie des résidus de bauxite	46
3.3	Comparaison entre la technique gravimétrique et spectroscopique	51
3.4	Évaluation de la méthode spectroscopique sur le terrain	55
4	Détermination de la teneur en résidus de bauxite dans les couverts nivaux	60
4.1	Relation entre l'albédo et la concentration en résidus de bauxite dans la neige	60
4.2	Corroboration de la relation entre l'albédo de la neige et sa concentration en résidus de bauxite par le modèle TARTES	68
4.3	Validation de la méthode spectroscopique du dosage de résidus de bauxite dans la neige .	70
4.4	Influence de la granulométrie des résidus de bauxite	75
	Conclusion	80
	Annexe	84
	Bibliographie	91

Liste des tableaux

1	Abondances relatives de divers composés retrouvés dans les résidus de bauxite selon une analyse par DRX réalisée au département de chimie de l'Université de Sherbrooke	10
2	Paramètres des droites d'étalonnage des résidus de bauxite humides provenant de la figure 29	42
3	Paramètres des droites d'étalonnage des résidus de bauxite congelés provenant de la figure 30	45
4	Comparaison des longueurs d'onde observées où l'albédo est minimal pour les deux bandes IR en fonction du taux de siccité	50
5	Paramètres de deux expériences de suivis d'évaporation de résidus de bauxite par gravimétrie et par spectroscopie	52
6	Comparaison des résultats de taux de siccité selon la technique gravimétrique et spectroscopique pour diverses surfaces du SDRB en automne	55
7	Comparaison des résultats de taux de siccité selon la technique gravimétrique et spectroscopique pour diverses surfaces du SDRB en hiver	57
8	Valeurs numériques aux paramètres des modèles empiriques (équations 4.2 et 4.3)	63
9	Limite de détection (LOD) et limite de quantification (LOQ) du dosage de résidus de bauxite dans la neige par spectroscopie	71
10	Comparaison de la méthode spectroscopique du dosage de résidus de bauxite dans la neige à des résultats de filtration	72
11	Valeurs numériques des paramètres du modèle empirique inverse (équation 4.2)	87
12	Valeurs numériques des paramètres du modèle empirique exponentiel (équation 4.3) . . .	88

Liste des figures

1	Bassin de rétention des boues rouges produites par l'usine Vaudreuil de Rio Tinto Alcan .	1
2	Dans la nuit du 19 au 20 janvier 2013, des poussières de résidus de bauxite ont été emportées vers des quartiers résidentiels de Jonquière (5)	2
3	Comparaison des forces de capillarité, de gravité et de friction du vent sur les résidus miniers en fonction de leur taille de particule (6)	3
4	Site de disposition des résidus de bauxite de l'usine Vaudreuil au Saguenay pendant la saison hivernale	4
5	Exemples de la rétroaction de l'albédo et du cercle vicieux qui pourraient expliquer la fonte des glaciers (14)	7
6	Image thermique de cinq dépôts contrôlés de résidus de bauxite qui provoquent l'augmentation de la température de la neige	8
7	Schéma de la production d'alumine par le procédé Bayer	9
8	Images agrandies d'un facteur 200 (A) et 2000 (B et C) par un microscope à balayage visuel (MEB) des résidus de bauxite (6)	11
9	Tomographie par rayons X d'un échantillon de résidus de bauxite avec une fraction solide de 69% (6)	12
10	Représentation des plages spectrales du visible et de l'infrarouge (19)	13
11	Modes vibrationnels, leurs longueurs d'onde et leur énergie pour l'état gazeux de l'eau .	14
12	Identification des bandes d'absorption de l'eau par le spectre d'albédo visible et infrarouge de la neige	15
13	Comparaison des spectres d'albédo de la neige, de résidus de bauxite secs et d'un couvert d'eau sur une surface réfléchissante	16
14	Visualisation schématique du parcours d'un rayon au travers d'une substance quelconque	17
15	Indices de réfraction réels de l'eau (31), de la glace (32) et de l'hématite (33) dans les longueurs d'onde du visible et de l'IR proche	18

16	Réflectivité d'une interface d'eau, de glace et d'hématite dans les longueurs d'onde du visible et de l'IR proche	19
17	Coefficients d'absorption de l'eau, de la glace et de l'hématite dans le spectre du visible et de l'IR proche	22
18	Démonstration de différents chemins que peut prendre un rayon lumineux pour atteindre une destination malgré la diffusion	23
19	Le spectroradiomètre <i>Analytical Spectral Device</i> est transportable dans un sac conçu pour les mesures extérieures	27
20	Le détecteur est le fil noir relié à l'ASD (fibre optique) qui finit en un manche auquel un cylindre est attaché pour ajuster le champ de vision	28
21	Le spectralon est utilisé pour faire le blanc avant chaque mesure d'albédo	29
22	Montage en laboratoire pour des mesures avec l'ASD	29
23	Apparence des résidus de bauxite humides pour 56%, 70% et 76% de taux de siccité . . .	32
24	Évolution de l'apparence des résidus de bauxite congelés à -4°C pour 60%, 65%, 70% et 75% de taux de siccité	33
25	Préparation d'échantillons de neige avec différentes quantités de résidus de bauxite (les unités sont en nombre de milligrammes de résidus par gramme de neige soit des mg/g) .	34
26	Exemples de simulations de l'albédo de couverts nivaux de différentes surfaces spécifiques (SS), comparativement à un couvert nival expérimental	35
27	Spectres d'albédo de résidus de bauxite humides avec des taux de siccité variables analysés en laboratoire avec un ASD	39
28	Spectres d'albédo normalisés à 1250 nm de résidus de bauxite humides de siccités variables (normalisation à 1250 nm)	40
29	Étalonnage de l'albédo aux bandes $2\nu_{1,3}$ (1450 nm) et $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1925 nm) par rapport à celui de la référence (1250 nm) en fonction des taux de siccité des résidus de bauxite humides	41

30	Étalonnage de l'albédo aux bandes $2\nu_{1,3}$ (1475 nm) et $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1950 nm) par rapport à celui de la référence (1250 nm) en fonction des taux de siccité des résidus de bauxite congelés	46
31	Comparaison des droites d'étalonnage de l'albédo aux bandes $2\nu_{1,3}$ et $\nu_{1,3} + \nu_2$ par rapport à celui à 1250 nm en fonction des taux de siccité des résidus de bauxite humides et congelés	47
32	Spectres d'albédo normalisés à 1250 nm de résidus de bauxite congelés de siccités variables	48
33	Comparaison des longueurs d'onde observées où l'albédo est au plus faible pour la bande $2\nu_{1,3}$ en fonction du taux de siccité	49
34	Comparaison des longueurs d'onde observées où l'albédo est au plus faible pour la bande $\nu_{1,3} + \nu_2$ en fonction du taux de siccité	49
35	Montage d'une balance automatique accompagné d'un ASD qui analyse l'évaporation libre de boues rouges	52
36	Comparaison gravimétrique et spectroscopique (selon les résultats de la figure 29 de la bande $2\nu_{1,3}$) du taux de siccité de résidus de bauxite granuleux initialement à 80,6% . . .	53
37	Comparaison gravimétrique et spectroscopique (tiré de l'interpolation ou l'extrapolation de la figure 29 de la bande $2\nu_{1,3}$) du taux de siccité de résidus de bauxite humides initialement à 56,2%	54
38	Spectres bruts d'albédo de certaines surfaces étudiées au SDRB pendant l'automne . . .	56
39	Spectres bruts d'albédo de certaines surfaces étudiées au SDRB pendant l'hiver	58
40	Spectres bruts d'albédo d'échantillons de neige rose préparés avec différentes concentrations en résidus de bauxite	61
41	Spectres d'albédo normalisés à 750 nm d'échantillons de neige rose préparés avec différentes concentrations en résidus de bauxite	62
42	Dépendance de l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) des échantillons préparés de neige rose en fonction de la teneur en résidus de ceux-ci	63
43a	Comparaison des deux modèles empiriques (équations 4.2 et 4.3) à la relation expérimentale de l'albédo relatif selon la teneur en résidus des échantillons	64

43b	Détails de la comparaison de la figure 43a entre 0 et 10 mg/g de teneur	64
44	Dépendance de l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) des échantillons de neige rose en fonction de T_i (équation 4.4)	65
45	Dépendance de l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) des échantillons de neige rose en fonction de T_e (équation 4.5)	66
46	Comparaison entre l'albédo relatif (490nm / 750 nm) des mesures expérimentales et des simulations par le modèle TARTES (hématite) en fonction de la teneur en contaminants .	68
47	Spectre UV-vis d'une suspension aqueuse de résidus de bauxite (sans tamisage) à 1200 g/L	76
48	Absorbance UV-vis (420 nm) pour différentes granulométries de résidus de bauxite en fonction de leur concentration massique dans l'eau	77
49	Absorbance UV-vis (420 nm) pour différentes granulométries de résidus de bauxite en fonction du nombre total de particules en suspension dans l'eau	77
50	Absorbance UV-vis (420 nm) pour différentes granulométries de résidus de bauxite en fonction de l'aire totale des résidus dans l'eau	78
51a	Analyse des résidus de la régression à 1450 nm de la figure 29	84
51b	Analyse des résidus de la régression à 1925 nm de la figure 29	84
52a	Analyse des résidus de la régression à 1475 nm de la figure 30	85
52b	Analyse des résidus de la régression à 1950 nm de la figure 30	85
53	Analyse des résidus de la régression du modèle inverse de la figure 44	86
54	Analyse des résidus de la régression du modèle exponentiel décroissant de la figure 45 .	86

Introduction

Contexte : emportement de poussières fugitives

Les usines d'alumine extraient mondialement des millions de tonnes de ce produit annuellement ; en 2008, un peu plus de 60 millions de tonnes d'alumines sortaient des usines (1). Malheureusement, partant du minerai de bauxite, le procédé rejette également une fois et demie plus de boues rouges que d'alumine (1). De plus, il n'y a pas vraiment d'options de revalorisation rentable (2).

Les boues rouges sont traitées pour neutraliser la soude caustique concentrée nécessaire pour extraire l'aluminium. En séchant, elles deviennent des résidus de bauxite et, déjà en 2007, 2,7 milliards de tonnes étaient entreposées à ciel ouvert dans le monde (3). Les déchets sont initialement entreposés dans des sites de disposition (figure 1) pour s'évaporer naturellement.



Figure 1. Bassin de rétention des boues rouges produites par l'usine Vaudreuil de Rio Tinto Alcan

Le processus entier du traitement peut prendre quelques années. Le problème auquel les gestionnaires des sites font face est l'emportement indésirable de fines poussières des résidus miniers (4) hors des délimitations permises. Faute de connaissances solides, ces emportements sont parfois imprévisibles et causent une détérioration visuelle pour les résidents voisins ; mentionnons l'incident survenu au Saguenay en janvier

2013 à l'usine de Vaudreuil d'Arvida de Rio Tinto Alcan au Saguenay (figure 2) qui fit la manchette des journaux (5).



Figure 2. Dans la nuit du 19 au 20 janvier 2013, des poussières de résidus de bauxite ont été emportées vers des quartiers résidentiels de Jonquière (5)

La figure 3 montre les différentes forces qui agissent sur les poussières fugitives (6). Les forces capillaire et gravitationnelle permettent la rétention au sol alors que la force de friction que les vents exercent sur les poussières cause directement les emportements.

Il est évident que la force capillaire (prodiguée par l'eau) est amplement suffisante pour assurer la rétention des composés mouillés au sol. Mais, l'eau finit éventuellement par s'évaporer. Même pendant l'hiver, il y a de la sublimation dans les résidus de bauxite congelés (7). Lorsque la force capillaire est éliminée, la force gravitationnelle est alors directement en compétition avec la force de friction. Cette dernière l'emporte lorsque la vitesse des vents est suffisante ou lorsque les particules sont assez petites.

Pour contrer les poussières fugitives, des ressources substantielles sont consacrées. Il existe des méthodes efficaces et très simples d'application pour prévenir les emportements. Le protocole exact dépendra des conditions particulières rencontrées par chacune des usines. Les abat-poussières (par exemple, du sable, de la neige, des copeaux de bois) et le mouillage de la surface des résidus (4) pour préserver ou restaurer la force capillaire de l'eau sont les plus communs à l'usine Vaudreuil.

Dans le premier cas, il faut une quantité élevée d'abat-poussières ainsi que de la machinerie lourde pour les déposer. Puis, ces abat-poussières, bien que non polluants, prennent de la place avec les résidus dans

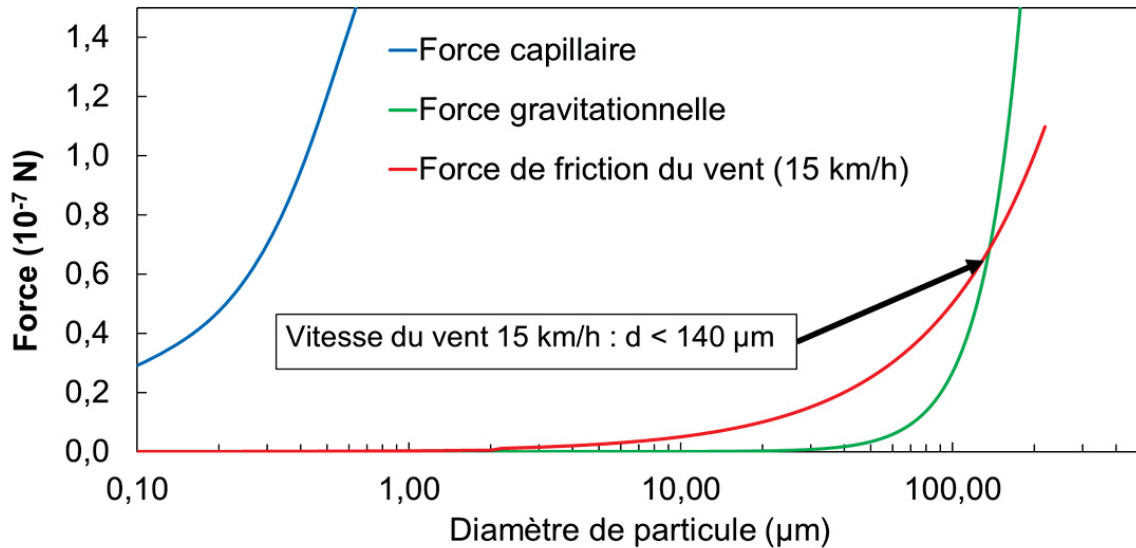


Figure 3. Comparaison des forces de capillarité, de gravité et de friction du vent sur les résidus miniers en fonction de leur taille de particule (6)

les sites d'enfouissement. Dans l'autre cas, si les résidus de bauxite sont remouillés, l'eau utilisée peut empêcher l'évaporation des boues rouges puisque l'ajout s'additionne au bilan hydrique. Ce bilan permet de suivre les entrées et les sorties d'eau des sites de disposition (8).

Ainsi, les différentes facettes du problème sont les suivantes :

- Quelles sont les conditions météorologiques qui peuvent déclencher un emportement de poussières ?
- Serait-il possible de suivre l'évaporation des résidus miniers avec une méthode spectroscopique ?
- Est-ce qu'un indice de risque de l'emportement des poussières pourrait être créé à partir de résultats spectroscopiques pour aider à la prise des décisions pour la gestion des sites de disposition ?

Le mémoire ci-présent se penche principalement sur le développement de deux méthodes spectroscopiques et de leurs applications. Plus spécifiquement, la première permet d'analyser la quantité d'eau dans les résidus de bauxite pour aider à déterminer leur risque d'emportement. La deuxième méthode évalue la teneur de ces résidus dans la neige afin de suivre les déplacements locaux des poussières fugitives sur les couverts nivaux. Cela permettrait de mieux comprendre les processus d'emportement en conditions hivernales.

Le projet est en étroite collaboration avec l'usine Vaudreuil au Saguenay. Leur site de disposition des résidus de bauxite (SDRB) a été très utile pour tester sur le terrain, surtout pendant l'hiver, les méthodes spectroscopiques développées (figure 4).



Figure 4. Site de disposition des résidus de bauxite de l'usine Vaudreuil au Saguenay pendant la saison hivernale

Chapitre 1

Théorie

1.1 Définition de l'albédo

La spectroscopie peut être pratiquée hors d'un laboratoire, sur le terrain. Lorsque des mesures optiques y sont effectuées, un détecteur capte l'énergie solaire réfléchie par une surface d'intérêt. Les experts en géomatique, dans leurs travaux, abordent systématiquement l'albédo pour décrire l'intensité de la réflexion solaire. En voici la définition, paraphrasée de Coakley (9) :

Albédo

Blancheur en latin

Portion de la lumière solaire réfléchie par une surface. La portion non réfléchie est absorbée de telle sorte que cela entraîne une augmentation de la température de la surface.

L'albédo varie entre 0 (lumière totalement absorbée) et 1 (lumière totalement réfléchie). La définition omet la transmission des rayons au travers de la surface et leur diffusion. Comme les surfaces mesurées sur le terrain sont généralement opaques, la transmission est toujours nulle. Bien qu'il puisse y en avoir un peu sur une certaine profondeur (imaginons que la surface d'intérêt est constituée de plusieurs couches), éventuellement, les rayons non réfléchis s'éteignent.

Pour ce qui est de la diffusion, cela survient lorsqu'une des couches de la surface va propager un rayon incident dans de multiples directions. Ces nouvelles directions, où les rayons sont déjà atténués, vont rencontrer la couche subséquente où il peut alors y avoir encore de la transmission, de la réflexion, de l'absorption ou de la diffusion. Bref, ces processus continuent jusqu'à ce que tous les rayons soient absorbés ou réfléchis en dehors du milieu. Néanmoins, même si elles ne font pas partie de la définition, la transmission et la diffusion restent des paramètres importants pour la modélisation de l'albédo.

Aussi, la définition de l'albédo ressemble beaucoup à celle de la réflexion qui est la portion réfléchie d'un rayon incident pour un angle spécifique. La différence est que l'albédo considère l'ensemble des rayons réfléchis par une surface (10).

En général, les travaux qui s'intéressent à l'albédo étudient des surfaces extérieures comme des couverts végétaux, la neige, des glaciers, etc. Voici certains exemples d'études utilisant l'albédo comme outil. Dans une première, on y compare les températures entre deux recouvrements de peintures exposés au soleil

dans une ville (11). Dans une autre étude, une cartographie de la lune (visible grâce aux rayons solaires réfléchis) est réalisée (12).

La neige possède un albédo élevé, surtout pour la lumière visible, mais il diminue si des poussières minérales ou de la suie y sont déposées (13).

Plus encore, certains chercheurs expliquent la fonte de glaciers par la rétroaction de l'albédo nivale (14) (15). Pour l'expliquer, considérons deux paramètres qui font diminuer l'albédo des glaciers et qui favorisent leur fonte. D'abord, il y a l'introduction de contaminants, comme des aérosols qui absorbent les rayons solaires et augmentent la température des glaciers, comme expliquée par la définition de l'albédo. Puis, cette hausse de température accélère le métamorphisme de la neige qui est qualifié selon sa densité et sa surface spécifique (16).

Or, cela diminue encore plus l'albédo, augmente encore la température, accélère le métamorphisme et ainsi de suite jusqu'à la fonte du glacier. Ainsi, l'introduction de contaminants a entraîné un cercle vicieux soit la rétroaction de l'albédo nivale (figure 5).

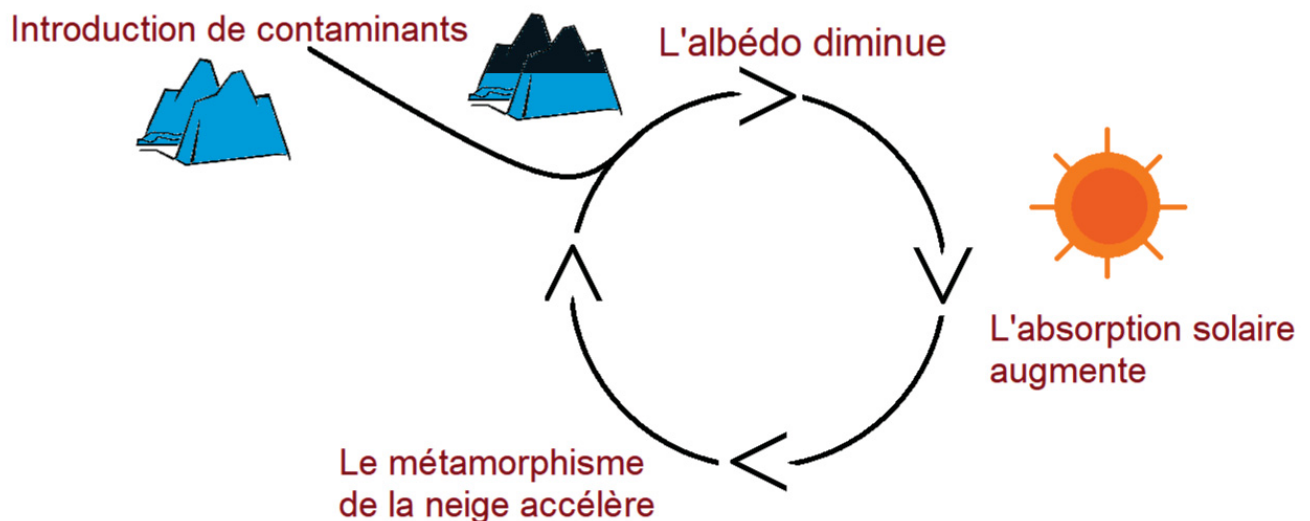


Figure 5. Exemples de la rétroaction de l'albédo et du cercle vicieux qui pourraient expliquer la fonte des glaciers (14)

Dans le cadre du projet, plusieurs mesures d'albédo sont rapportées pour la lumière visible et l'infrarouge proche. Les surfaces d'intérêt étudiées sont les résidus de bauxite et la neige. La contamination de la neige par les résidus entraîne une diminution de son albédo et une augmentation de la température. Comme preuve, une image thermique prise avec une caméra infrarouge dénote cette augmentation (figure 6).

Dans celle-ci, les cinq cercles plus chauds (dénotés par l'échelle thermique à droite de la figure 6) sont la conséquence d'un dépôt de résidus de bauxite sur la neige.

Bref, les méthodes développées et expliquées dans ce mémoire utilisent principalement des mesures d'albédo. D'abord, pour déterminer la quantité d'eau dans les résidus de bauxite, puis pour déterminer la quantité de résidus dans la neige. La température des surfaces, bien qu'utile dans nos travaux préliminaires (figure 6), ne fait pas l'objet des discussions puisque c'est une mesure instable sur le terrain.

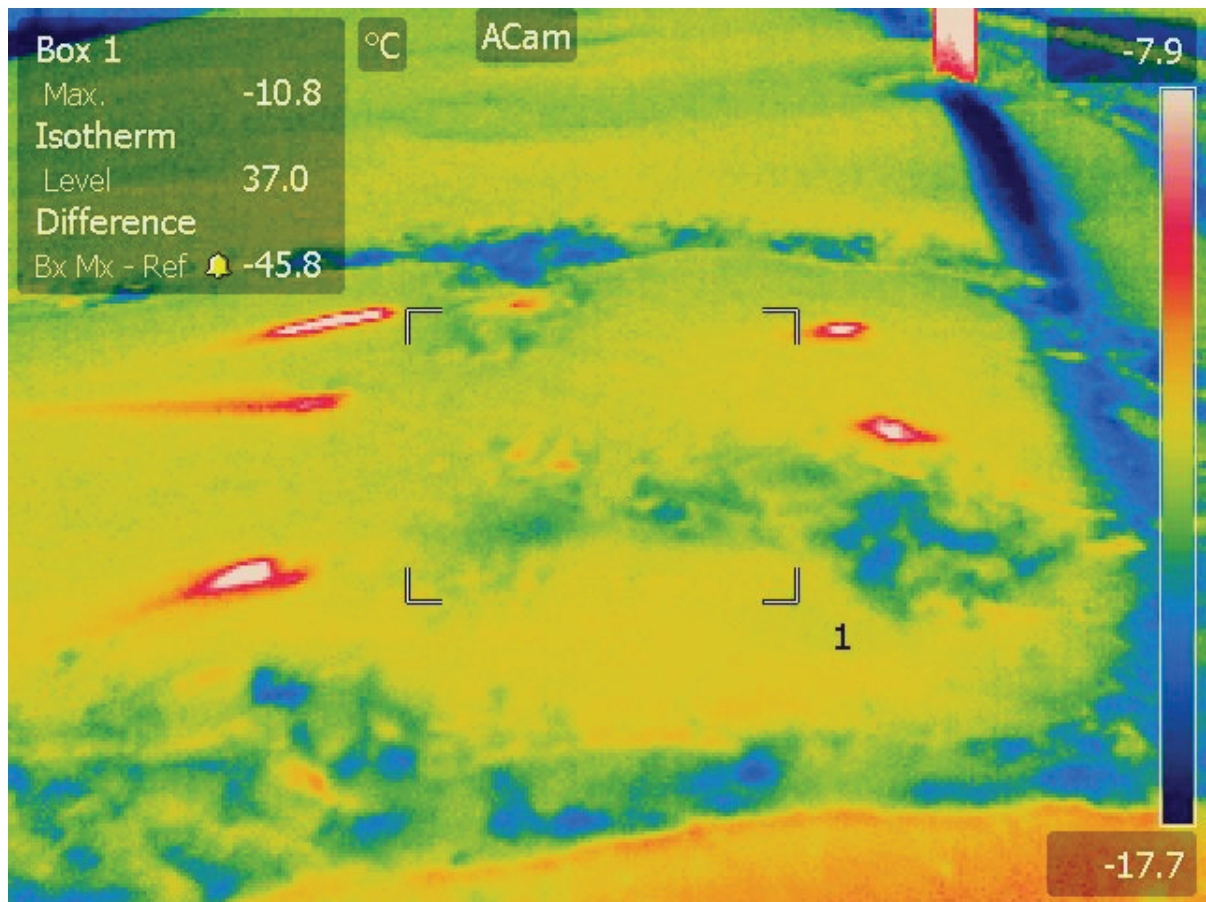


Figure 6. Image thermique de cinq dépôts contrôlés de résidus de bauxite qui provoquent l'augmentation de la température de la neige

1.2 Caractéristiques des résidus de bauxite

L'usine Vaudreuil d'Arvida au Saguenay, collaborateur du projet, produit leur alumine par le procédé Bayer (17). Il consiste à digérer le minerai de bauxite, riche en aluminium, avec de la soude caustique concentrée. La phase liquide obtenue contient de l'hydroxyde d'aluminium III et elle est décantée, précipitée puis calcinée pour obtenir l'alumine (figure 7).

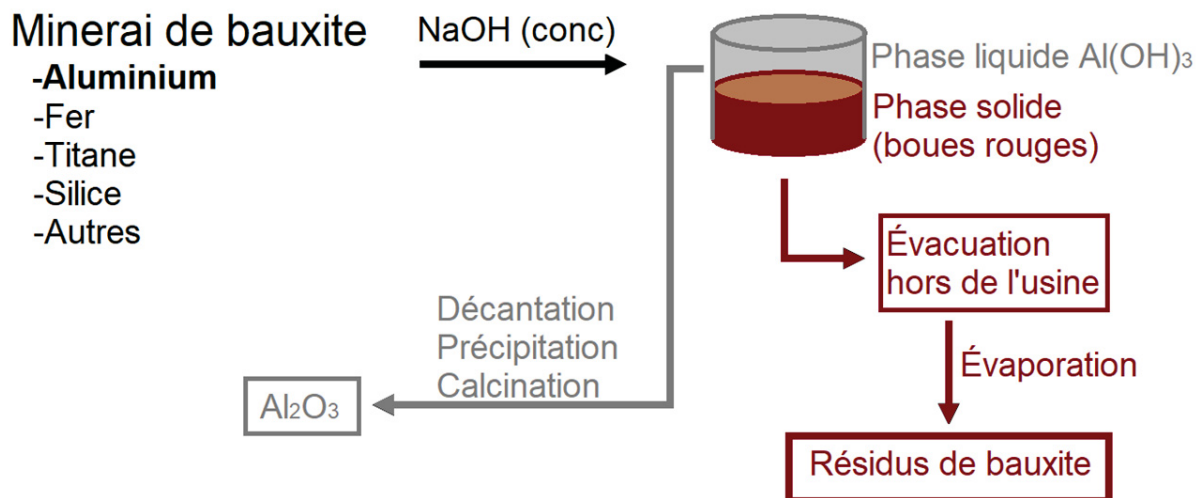


Figure 7. Schéma de la production d'alumine par le procédé Bayer

Cela dit, la portion pertinente au projet est la phase solide qui forme les boues rouges qui sèchent en résidus de bauxite. En analysant les résidus par diffraction aux rayons X (DRX) (analyse réalisée au département de chimie de l'Université de Sherbrooke), leur composition et leurs abondances relatives ont été relevées dans le tableau 1. La partie supérieure du tableau est réservée pour les composés déjà retrouvés dans le minerai de bauxite, alors que la partie inférieure représente des composés générés lors du processus industriel. Par ailleurs, c'est l'hématite qui donne la couleur orangé et rougeâtre au minerai et aux résidus de bauxite.

Les composés retrouvés sont expliqués dans le tableau 1 et ils sont corroborés par la littérature (1) (2). Les abondances relevées varient selon les différents types de résidus de bauxite de différentes usines. Également, des travaux connexes avaient aussi noté des observations très similaires (6).

Composé		Abondance (%)
Hématite	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	10,5
Goethite	$\alpha\text{-FeO(OH)}$	8,76
Magnetite	Fe_3O_4	4,74
Diaspore	$\alpha\text{-AlO(OH)}$	2,44
Boehmite	$\gamma\text{-AlO(OH)}$	4,48
Gibbsite	$\gamma\text{-Al(OH)}_3$	2,93
Rutile	TiO_2	3,35
Quartz	SiO_2	2,83
Sodalite	$\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$	5,95
Cancrinite	$\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2[\text{CaCO}_3]$	8,65
Perovskite	CaTiO_3	10,3
Whewellite	CaC_2O_4	7,93

Tableau 1. Abondances relatives de divers composés retrouvés dans les résidus de bauxite selon une analyse par DRX réalisée au département de chimie de l'Université de Sherbrooke

De même, certains de leurs paramètres physico-chimiques sont relevés dans la littérature (1). Les plus importants sont :

- Rayon des particules : $0,100$ à $200\ \mu\text{m}$;
- Densité : $(2,5 \pm 0,7)\ \text{g/cm}^3$;
- Surface spécifique : $(32,7 \pm 12,2)\ \text{m}^2/\text{g}$.

Les résidus de bauxite ont été inspectés au microscope électronique à balayage (MEB) et avec une tomographie par rayons X dans des travaux connexes (6). La figure 8 est une image prise au MEB avec un facteur de 200 et 5000 en grandissement et la figure 9 est le résultat de la tomographie. Des expériences similaires d'imagerie avaient été réalisées par Zhu *et al* (18).

Ces images (figure 8 et 9) révèlent que les résidus de bauxite sont assez poreux. La portion solide est estimée à 69%. Il est facile pour l'eau de s'infiltrer dans les pores microscopiques.

Les résidus de bauxite sont utilisés dans les diverses expériences présentées tout au long du mémoire. Ils sont fournis par l'usine Vaudreuil de Rio Tinto, préalablement lavés et séchés. À partir de ces résidus de bauxite secs, des échantillons sont préparés tels qu'expliqués dans le chapitre de la méthodologie.

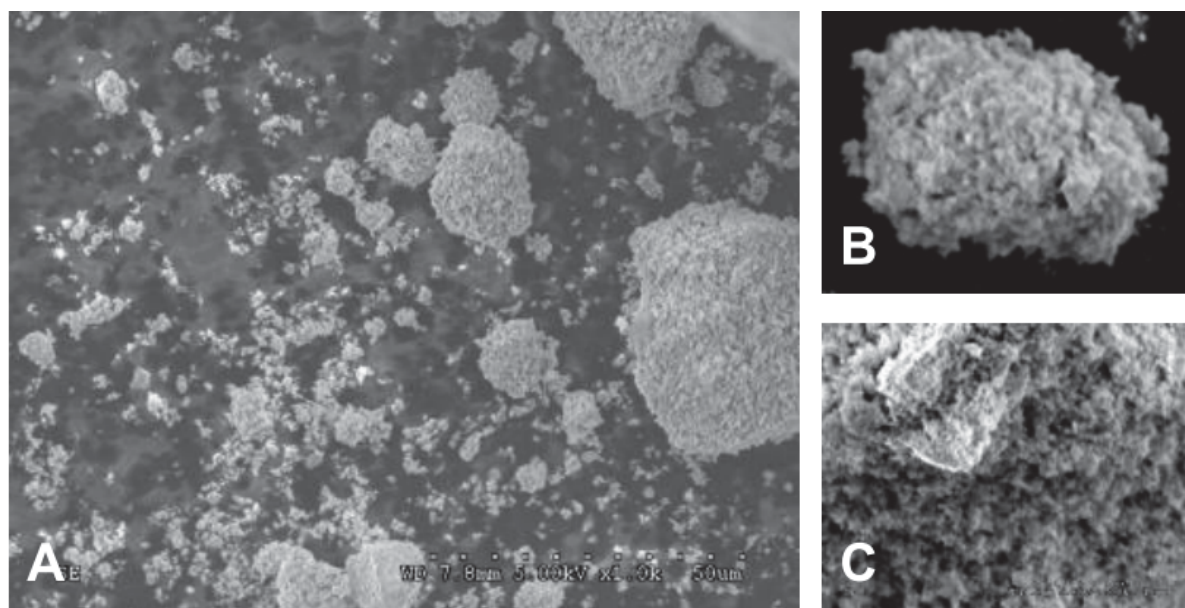


Figure 8. Images agrandies d'un facteur 200 (A) et 2000 (B et C) par un microscope à balayage visuel (MEB) des résidus de bauxite (6)

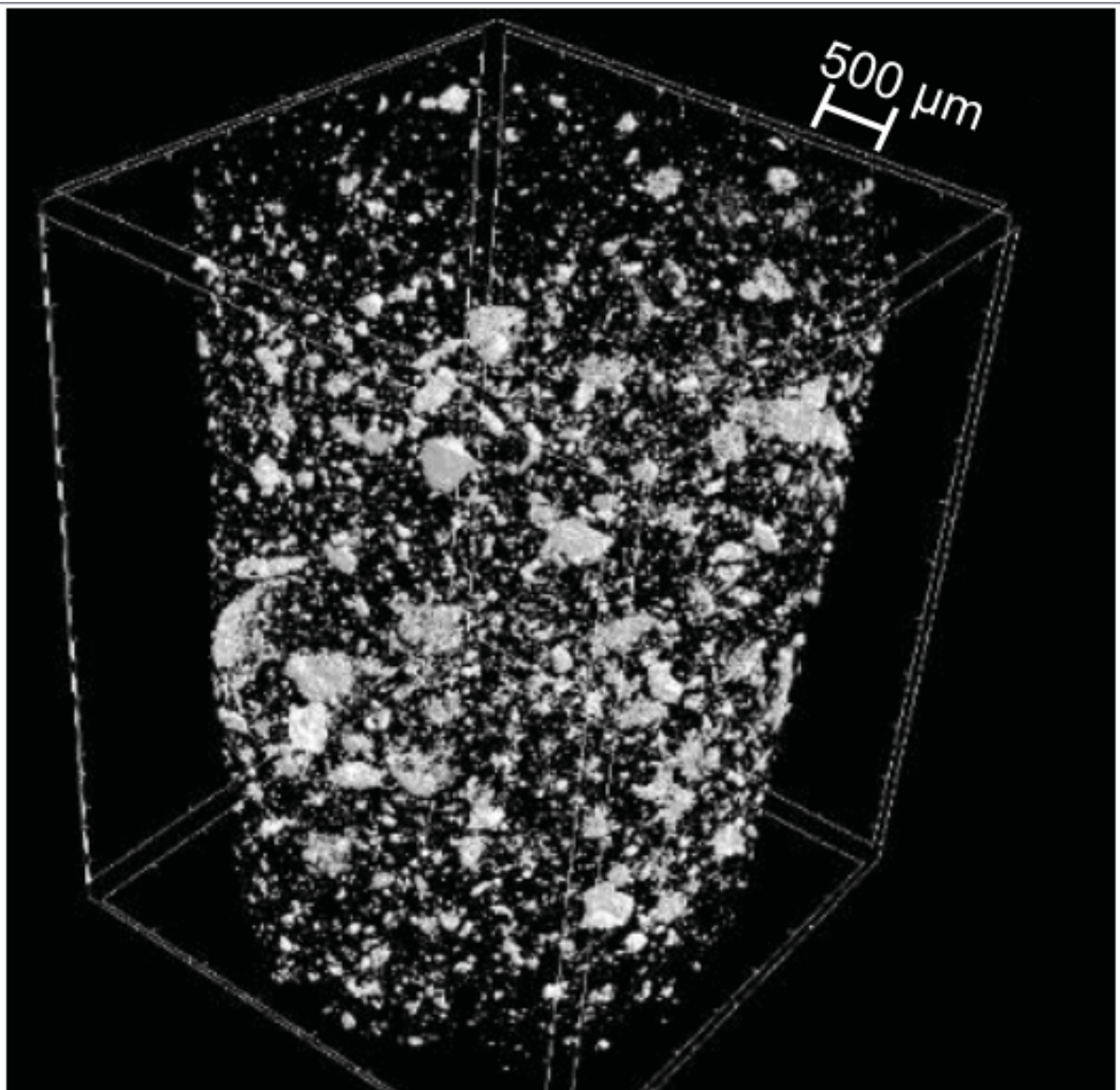


Figure 9. Tomographie par rayons X d'un échantillon de résidus de bauxite avec une fraction solide de 69% (6)

1.3 Spectroscopie infrarouge de l'eau

Comme le suivi du contenu en eau est très important dans les sites de disposition de résidus miniers (SDRB), la spectroscopie de l'eau devient un outil de dosage intéressant. En effet, l'eau absorbe des longueurs d'onde spécifiques dans l'infrarouge avec une intensité proportionnelle à la quantité d'eau. L'infrarouge (IR) peut être divisé en trois sections ; IR proche, moyen et lointain en ordre croissant de longueur d'onde (19). C'est résumé dans la figure 10.

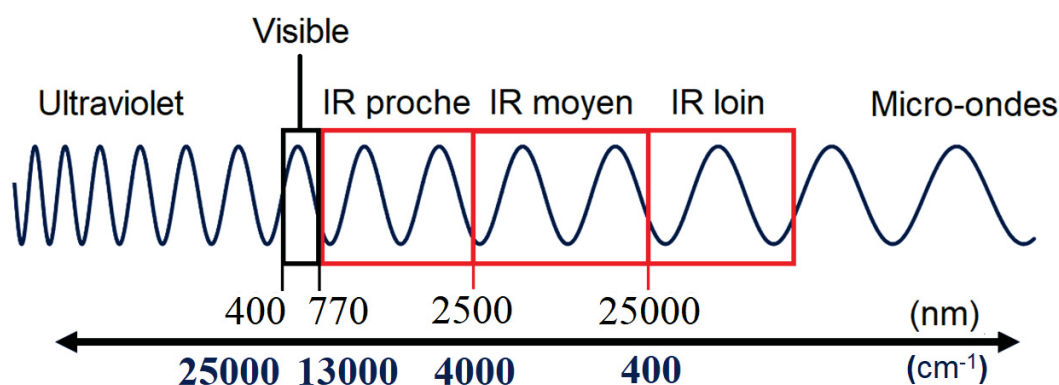


Figure 10. Représentation des plages spectrales du visible et de l'infrarouge (19)

Dans la littérature scientifique, des techniques de spectroscopie IR permettent de détecter l'eau et d'autres autres composés pertinents dans des domaines de recherche comme en agroalimentaire (20), en pharmaceutique (21) ou en écologie (22). Les avantages évoqués sont la flexibilité, la rapidité et la reproductibilité de la méthode ainsi que son caractère non invasif.

L'assignation des pics de H₂O est bien rapportée dans la littérature (23) (24) (25). En IR lointain, les pics d'absorbance sont générés par les mouvements rotationnels de l'eau. Ceux-ci sont détectés pour des molécules gazeuses puisque les états solides et liquides figent la molécule dans un réseau qui restreint ces mouvements.

En IR moyen, les bandes d'absorbance retrouvées sont les trois modes fondamentaux vibrationnels de l'eau, soit l'élongation symétrique, l'élongation asymétrique ainsi que le cisaillement (figure 11). Chacun possède une énergie vibrationnelle distincte des autres, quoique les deux modes d'élongations sont de valeurs similaires. Tous sont sujets à varier selon la température ou l'état du système.

En IR proche, la plage utilisée pour le projet, les bandes d'absorbance retrouvées sont composées de multiples modes fondamentaux précédemment décrits. Celles réalisées à partir d'un seul type de vibration

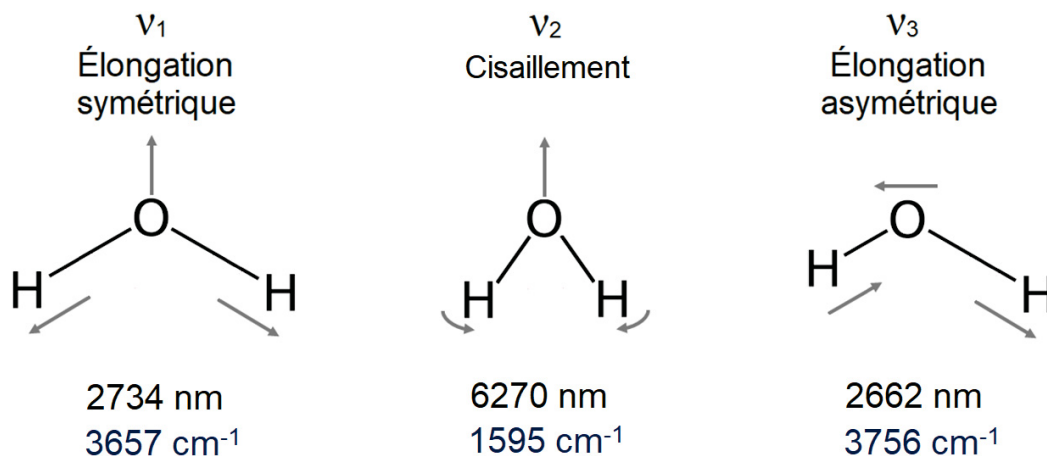


Figure 11. Modes vibrationnels, leurs longueurs d'onde et leur énergie pour l'état gazeux de l'eau

sont des **harmoniques**. Elles sont interdites, donc très improbables de se produire. Les transitions réalisées avec différents types de vibrations fondamentales sont des **combinaisons**. Elles sont permises et elles sont faciles à observer.

Par exemple, la figure 12 est un exemple de l'albédo spectral de la neige en visible et en IR proche (350 nm à 2500 nm). Les bandes d'absorbance où l'albédo chute soudainement, parce que la réflexion de la lumière est empêchée, ont été identifiées.

La bande à 1450-1500 nm correspond à $2\nu_{1,3}$, donc la combinaison entre une élongation symétrique et une élongation asymétrique. Celle à 1925-2050 nm est plus large parce que la bande correspond à $\nu_{1,3} + \nu_2$, donc la combinaison d'une élongation ou bien symétrique ou bien asymétrique avec un cisaillement ; les deux transitions sont très proches en énergie et se confondent entre elles. Les méthodes développées dans ce projet analysent l'albédo de ces deux bandes d'absorbance pour obtenir les informations recherchées.

Ensuite, la température de l'eau affecte ses bandes d'absorbance (26) (27). La force des liaisons hydrogène (ponts H) de l'eau varie, ce qui affecte directement ses liens intramoléculaires. Les ponts H sont plus faibles à mesure que la température augmente (l'agitation thermique défavorise ce type de lien). Ils sont aussi plus forts à l'intérieur de la glace que pour l'eau liquide, deux états différents de la matière.

Alors, la force des liens intramoléculaires varie inversement à celle des ponts H, comme si ceux-ci «tiraient» sur l'oxygène de l'eau et affaiblissaient ses liens avec ses hydrogènes. Ainsi, l'énergie des vibrations intramoléculaires fondamentales de l'eau (ν_1 , ν_2 et ν_3) diminue lorsque la température diminue et les bandes d'absorbance se déplacent légèrement vers les plus petits nombres d'onde (plus grandes longueurs d'onde).

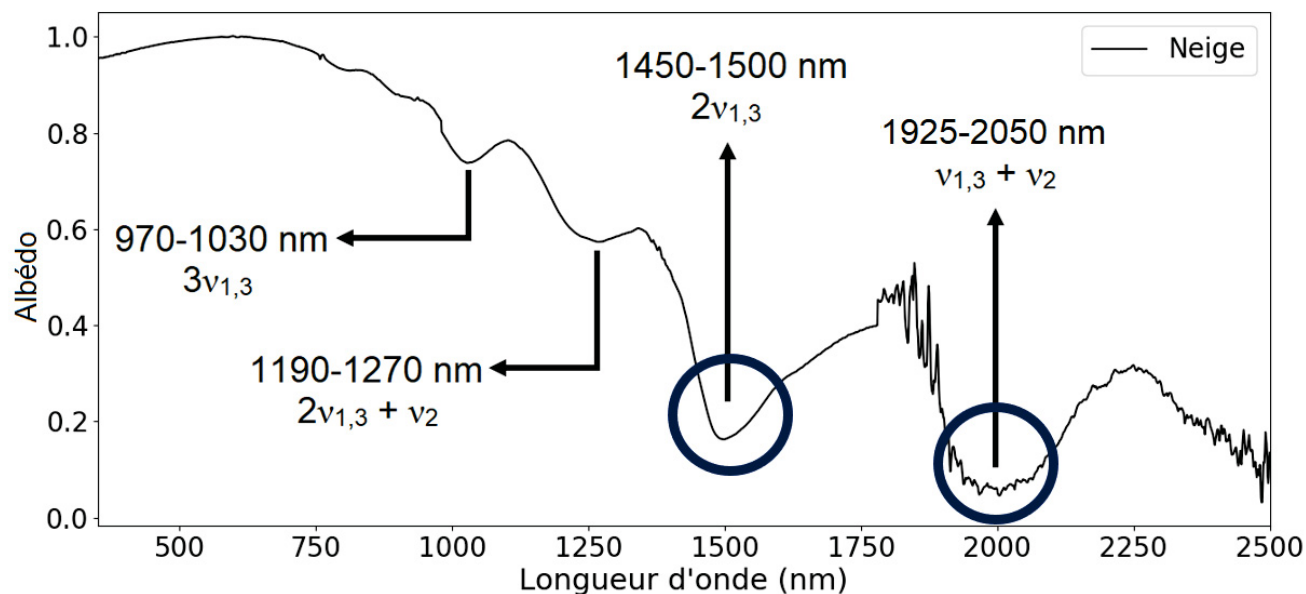


Figure 12. Identification des bandes d'absorption de l'eau par le spectre d'albédo visible et infra-rouge de la neige

En résumé, les techniques spectroscopiques IR sont intéressantes parce que leur signal est relié à la présence et aux quantités des substances d'intérêt. L'eau est facilement identifiable selon ses bandes d'absorbance. De plus, l'allure du spectre peut révéler certaines informations complémentaires comme sa température et son état. En effet, les bandes IR de la neige sont légèrement décalées vers les plus grandes longueurs d'onde par rapport à l'eau.

1.4 Concepts d'optique

Avant de présenter des spectres d'albédo dans les chapitres des résultats des expériences effectuées, il serait intéressant de visualiser les spectres des trois composés principaux du projet ; la neige, les résidus de bauxite et l'eau. Leur albédo expérimental est présenté à la figure 13. L'albédo de l'eau, à cause de sa transparence, dépend de son environnement. Par exemple, l'albédo d'un océan est de 0,07 en moyenne (9). Cependant, une mince couche d'eau (1 ou 2 mm) sur une surface réfléchissante a un spectre très similaire à celui de la neige. C'est ce dernier cas qui est présenté à la figure 13.

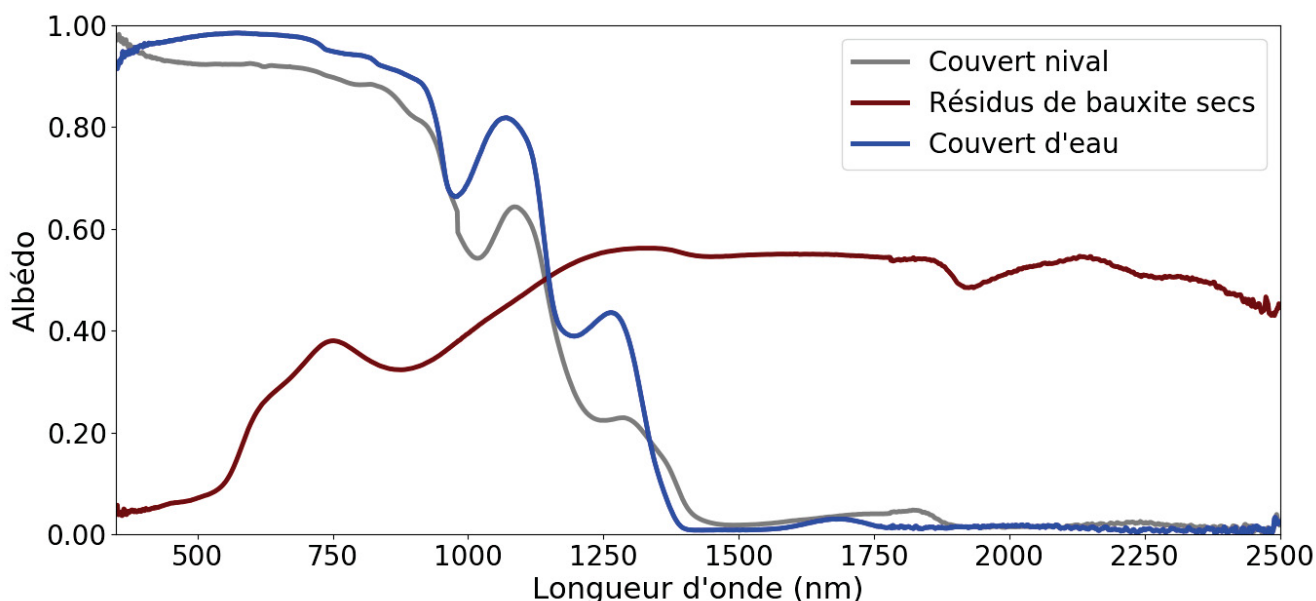


Figure 13. Comparaison des spectres d'albédo de la neige, de résidus de bauxite secs et d'un couvert d'eau sur une surface réfléchissante

La neige et l'eau voient leur albédo maximal dans la région du visible (entre 400 et 750 nm), mais il décroît dans la région IR (750 nm et plus). Elles ont quelques bandes d'absorbance où le signal chute ; celles-ci avaient été identifiées à la figure 12. Les bandes à $2\nu_{1,3}$ (1450-1500 nm) et à $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1925-2050 nm) se démarquent ; l'albédo y est pratiquement nul.

Pour ce qui est des résidus de bauxite secs, leur comportement est un peu l'inverse. À savoir, leur albédo est minimal dans la région du visible, mais il y croît rapidement pour atteindre un pic vers 750 nm qui correspond à la couleur rouge des résidus. Dans la zone IR, l'albédo est modeste et se stabilise à environ 0,55. Néanmoins, il chute légèrement vers 1925 nm à cause de la petite quantité d'eau adsorbée à la surface des résidus miniers.

Ci-dessous, des concepts d'optique sont présentés pour tenter d'expliquer les variations d'albédo entre

l'eau, la neige et les résidus de bauxite. On y discute de la transmission et de la réflexion d'un rayon au travers d'un milieu et de l'atténuation par l'absorbance et la diffusion (voir figure 14). Des références très complètes sur l'optique peuvent être consultées dans la littérature (10) (28) (29).

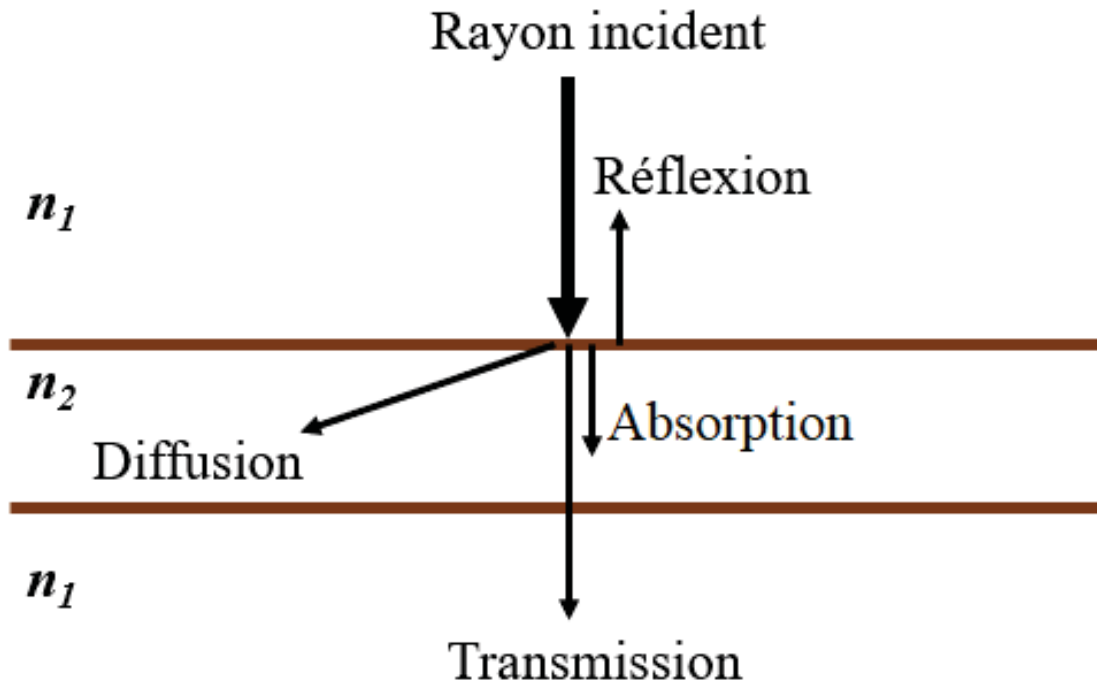


Figure 14. Visualisation schématique du parcours d'un rayon au travers d'une substance quelconque

1.4.1 Réflexion selon Fresnel

L'albédo a été défini comme étant la portion de lumière solaire réfléchi sur une surface. Il est donc important de comprendre comment la réflectivité d'une substance peut être calculée, et ce par les équations de Fresnel (30). D'abord, si le rayon incident est perpendiculaire à la surface d'intérêt (comme à la figure 14) alors, la réflectivité qui se produit à l'interface entre deux milieux différents peut être déterminée selon :

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \quad [1.1]$$

Avec R , la portion de lumière incidente réfléchi, n_1 et n_2 , les indices de réfraction réels des milieux en jeu. L'assignation de n_1 et n_2 n'a pas d'importance puisque l'équation 1.1 est symétrique. C'est-à-dire, la réflectivité est la même si le rayon passe du milieu 1 à 2 ou vice-versa.

Par exemple, au travers d'une fenêtre de verre ($n_{\text{verre}} \approx 1,5$) dans l'air ambiant ($n_{\text{air}} \approx 1,0$) la réflectivité à une interface est d'environ 4,0 %. Comme il y a deux interfaces à une fenêtre (une pour l'entrée et une pour la sortie), le résultat est doublé si les phénomènes d'atténuation sont négligés. Donc, plus il y a de transmission au travers de multiples interfaces, plus il y a d'occasions pour de la réflexion. C'est ce qui explique pourquoi la neige, du sel de table ou du sucre qui sont à priori transparents (pour une particule individuelle) apparaissent blancs à nos yeux ; chaque particule individuelle contribue à la réflectivité totale du spectre visible.

Ainsi, il est possible de calculer la réflectivité théorique des surfaces planes de l'eau, la glace, et l'hématite et de les comparer à l'albédo spectral de la figure 13. Pour cela, il est nécessaire de connaître les indices de réfraction réels des substances. Il est possible de retrouver, dans la littérature, ceux pour l'eau (31), la glace (32) et l'hématite (33). Comme les résidus de bauxite sont un mélange de plusieurs composés (tableau 1), l'hématite a été jugée la meilleure représentante, car elle est une composante des résidus de bauxite et leur confère leur couleur orangé et rougeâtre. Toutes ces données sont résumées à la figure 15.

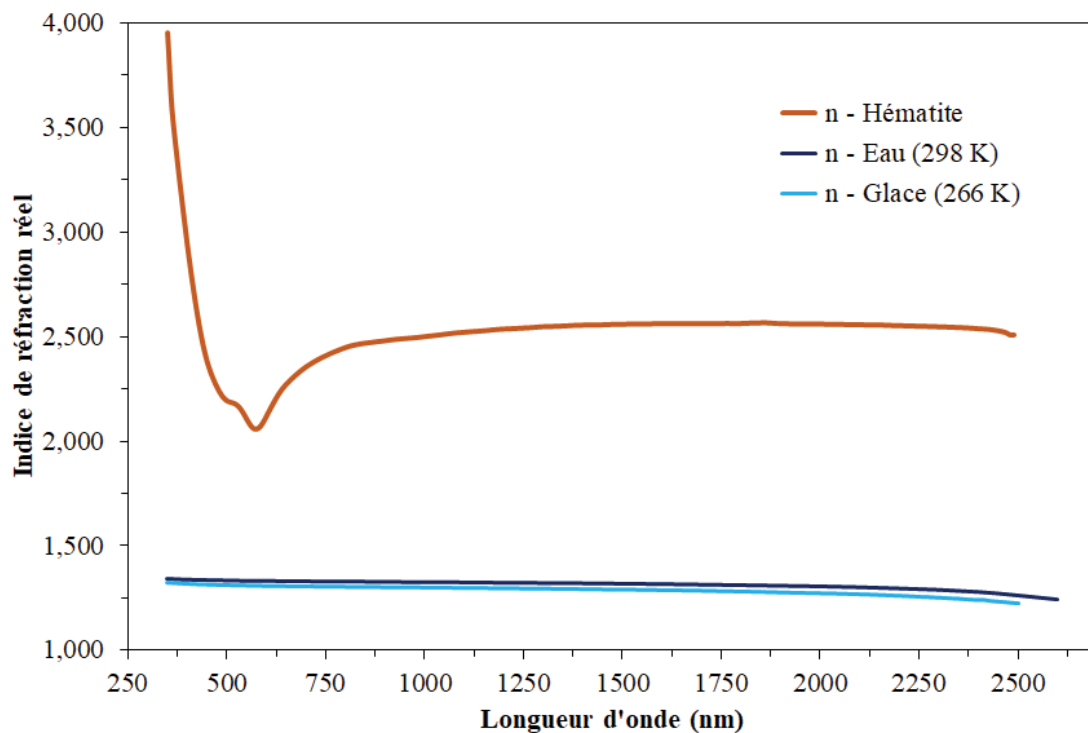


Figure 15. Indices de réfraction réels de l'eau (31), de la glace (32) et de l'hématite (33) dans les longueurs d'onde du visible et de l'IR proche

Puis, la figure 16 est obtenue en calculant les réflectivités (équation 1.1) de ces composés selon leurs propriétés optiques dans le spectre visible et IR. Seule une interface est considérée. En réalité, dans des matériaux finement divisés comme la neige ou les résidus de bauxite, la lumière subit beaucoup plus de réflexion. Les matériaux granulaires ont une plus grande réflectivité que leurs contreparties lisses.

Également, comme il sera expliqué un peu plus loin, l'introduction d'un angle au rayon incident (jusqu'ici considéré perpendiculaire à la surface) va aussi augmenter la réflectivité.

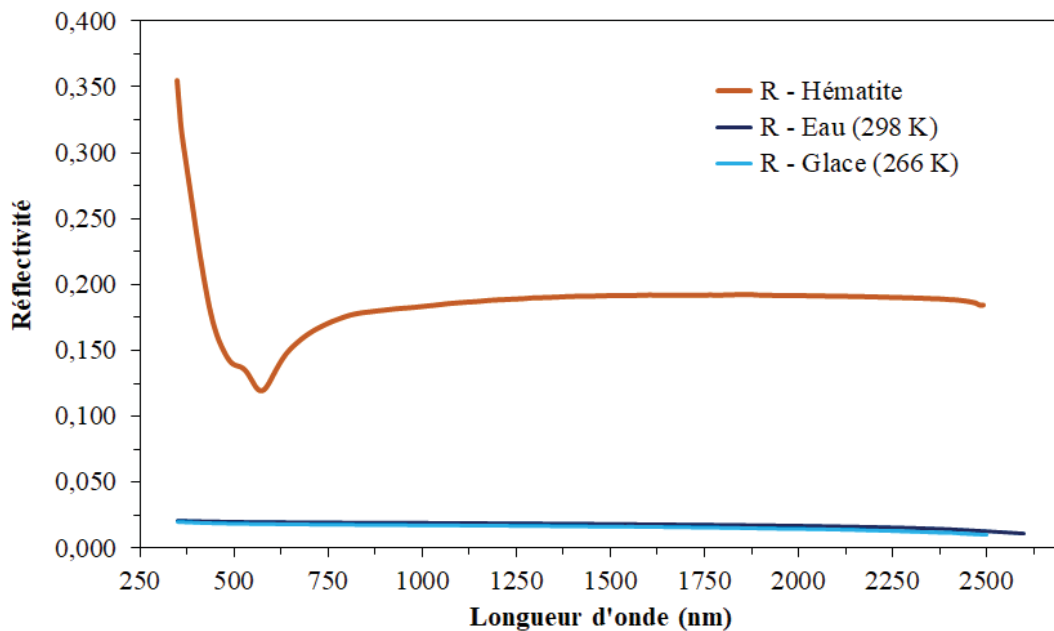


Figure 16. Réflectivité d'une interface d'eau, de glace et d'hématite dans les longueurs d'onde du visible et de l'IR proche

Comme anticipé, la réflectivité (figure 16) est sous-estimée par rapport à l'albédo (figure 13). Il serait plus pertinent de comparer les tendances et les variations entre ces figures. Par exemple, l'hématite a une réflectivité plutôt modeste dans l'IR proche, un comportement aussi retrouvé dans son spectre d'albédo. Par contre, dans le visible, l'albédo chute drastiquement alors que sa réflectivité est plus élevée. Dans le même ordre d'idées, la neige a une réflectivité plutôt fixe dans le visible et dans le proche IR, pourtant, son spectre d'albédo est riche en variations. Il est donc évident que le phénomène de réflexion, à lui seul, ne peut pas expliquer les modulations observées dans l'albédo spectral. Les phénomènes d'atténuation jouent aussi un rôle.

Ensuite, bien que le problème semble simple pour une incidence normale, il se complexifie pour une incidence oblique. Il faut alors considérer la polarisation de la lumière. Les démarches sont détaillées dans Judd *et al* (30). La conséquence de l'introduction d'un angle au rayon incident est simple ; la réflectivité est augmentée. De plus, la croissance de la réflectivité est de plus en plus rapide à mesure que cet angle augmente. Alors, lorsque des mesures d'albédo sont prises, il est important d'avoir une procédure fixe, au risque de faire varier l'albédo d'une mesure à l'autre.

En résumé, la réflexion est un phénomène qui survient systématiquement lorsque deux milieux différents partagent une frontière. Comme la neige et les résidus de bauxite sont constitués de fines particules, la

réflexion est accrue. Par contre, la réflexion à elle seule ne peut expliquer les diminutions dans les spectres d'albédo. Ces atténuations, dues à l'absorbance et la diffusion, sont expliquées dans le reste de ce chapitre.

1.4.2 Absorbance selon Beer-Lambert

L'eau, la neige et les résidus de bauxite sont des milieux absorbants qui atténuent la lumière à mesure que celle-ci voyage au travers d'eux. Par contre, le degré d'absorption, définie par le coefficient d'absorption α , varie d'une substance à l'autre et selon la longueur d'onde. Ci-dessous, les équations de Beer-Lambert (34) sont expliquées, puis les coefficients d'absorption calculés à partir de l'indice de réfraction imaginaire sont donnés.

D'abord, l'équation ci-dessous définit la transmittance qui est le degré de transmission d'un rayon incident au travers d'un composé :

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad [1.2]$$

Avec **T** étant la transmittance (sans unité), **I_t** l'intensité du rayon transmis et **I₀** l'intensité du rayon initial. Ces deux derniers peuvent être exprimés en candela (cd).

Puis, l'absorbance est définie par rapport à la transmittance :

$$A = -\log_{10}(T) \quad [1.3]$$

Avec **A** étant l'absorbance (sans unité).

L'équation de Beer-Lambert permet d'exprimer l'absorbance selon le coefficient d'absorption :

$$A = \alpha L \quad [1.4]$$

Avec α étant le coefficient d'absorption (en cm^{-1}) et **L** la distance traversée par le rayon incident au travers d'un milieu absorbant (en cm).

Enfin, en faisant une comparaison des équations 1.3 et 1.4, puis en utilisant la définition de la transmittance de l'équation 1.2, la relation suivante est obtenue :

$$I_t = I_0 10^{-\alpha L} \quad [1.5]$$

Ainsi, le rayon transmis s'éteint de manière exponentielle au coefficient d'absorption α et à la longueur L du milieu absorbant traversé. À noter que la concentration du composé absorbant n'est pas considérée parce que la relation 1.5 considère que la concentration est constante ou que le composé est le milieu. Plus loin dans ce mémoire, la concentration des résidus de bauxite dans la neige devient un paramètre important, alors α peut être exprimé selon :

$$\alpha = c \epsilon \quad [1.6]$$

Avec c , la concentration massique en résidus dans la neige (mg/g) et ϵ le coefficient d'extinction massique ($\frac{g}{mg \times cm}$).

Pour comparer l'absorption de l'eau, de la neige et des résidus de bauxite, il faut connaître leur indice de réfraction imaginaire afin de calculer leur coefficient d'absorption selon :

$$\alpha = \frac{4 \pi k}{\lambda} \quad [1.7]$$

Avec λ étant la longueur d'onde en cm et k l'indice de réfraction imaginaire (sans unité) qui donne le degré d'atténuation du faisceau dans le milieu.

Comme pour les indices de réfraction réels, les indices de réfraction imaginaires sont connus des mêmes références déjà mentionnées ; (31) pour l'eau, (32) pour la glace et (33) pour l'hématite (qui représente les résidus de bauxite). En utilisant leurs mesures et l'équation 1.7, la figure 17 est obtenue. En comparant cette figure à celle de l'albédo (figure 13), il est évident que l'absorption joue un rôle important dans les propriétés optiques et de l'albédo.

En effet, en considérant un composé à la fois, les régions du spectre où l'absorption est la plus élevée correspondent aux régions où l'albédo est le plus faible. Par exemple, l'hématite, entre 300 nm et 450 nm (longueur d'onde de l'UV, du violet et du bleu), absorbe presque totalement cette région et l'albédo y est très faible. À l'inverse, l'eau n'absorbe que très peu dans la région du visible (albédo élevé), mais beaucoup plus en IR (albédo faible).

Cela dit, il semble y avoir une contradiction lorsque l'eau est comparée aux résidus de bauxite. Ces derniers ont des coefficients d'absorption toujours supérieurs à ceux de l'eau (du moins pour le domaine spectral pertinent au projet). Par exemple, à 2000 nm, le α des résidus ($1,95 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$) est environ 30

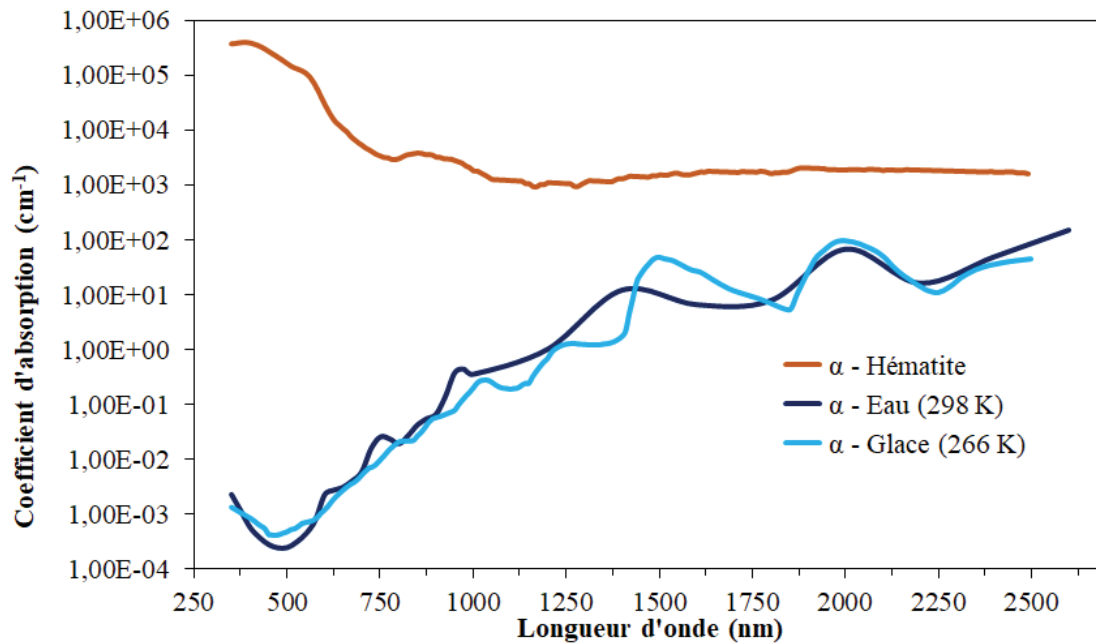


Figure 17. Coefficients d'absorption de l'eau, de la glace et de l'hématite dans le spectre du visible et de l'IR proche

fois supérieures à celui de l'eau ou de la neige ($69,1 \text{ cm}^{-1}$). En d'autres termes, revenant à l'équation 1.5, il suffit de théoriquement $23,6 \mu\text{m}$ d'hématite pour que le rayon transmis tombe à 1% de transmittance. Pour l'eau, il en faudrait $666 \mu\text{m}$. Cela considère seulement l'absorption, négligeant les phénomènes de réflexion et de diffusion.

Pourtant, c'est quand même l'albédo des résidus qui est plus élevé à 2000 nm . Il faut se rappeler que la réflectivité des résidus (19,2%) est largement plus grande à celle de l'eau ou la neige (1,8%). Il y a donc plus de réflexions qui surviennent dans les résidus avant que l'absorbance puisse éteindre complètement la transmission.

En résumé, l'absorbance est très importante pour expliquer les décroissances d'albédo pour des longueurs d'onde spécifiques. Comme l'atténuation est proportionnelle à la concentration de la substance en jeu, c'est un phénomène qui peut être exploité pour des dosages par spectroscopie. À savoir, la diminution d'un signal est utilisable pour quantifier la concentration de l'élément absorbant.

1.4.3 Diffusion selon Rayleigh et le modèle de Mie

La diffusion survient lorsqu'un faisceau lumineux rencontre une particule et qu'une propagation dans plusieurs angles s'ensuit. Les intensités des faisceaux ainsi diffusés sont beaucoup plus faibles que

celui d'origine. La loi de la conservation d'énergie stipule que la somme des intensités de tous les rayons diffusés équivaut à l'intensité du rayon incident, s'il n'y a pas eu d'absorption. Donc, la diffusion cause une extinction du rayon incident.

Cela dit, certains rayons résultants de la diffusion peuvent tout de même continuer leur chemin, être transmis et réfléchis (figure 18). Néanmoins, dans le contexte du projet, plus il y a de diffusion, moins l'albédo d'une surface est grand (35).

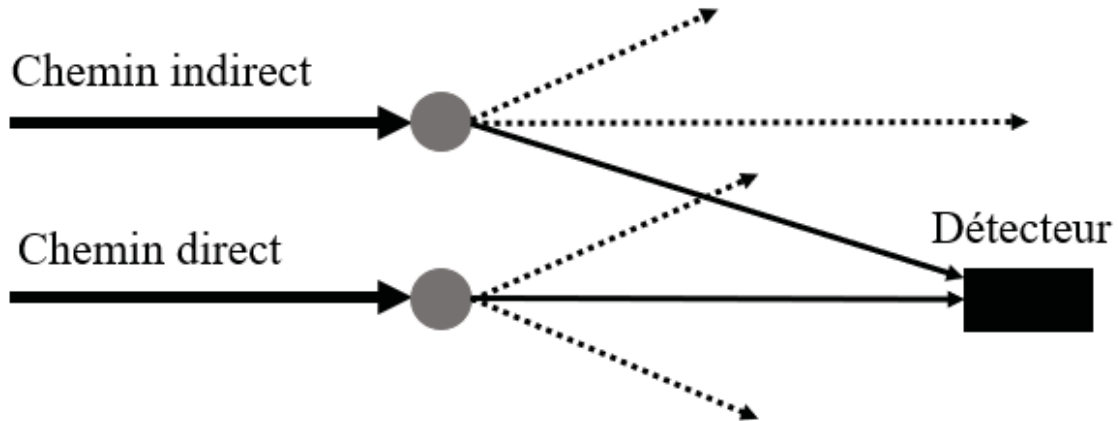


Figure 18. Démonstration de différents chemins que peut prendre un rayon lumineux pour atteindre une destination malgré la diffusion

Ci-dessous, la diffusion selon le modèle de Rayleigh et le modèle de Mie est expliquée (36). La diffusion est un processus plus complexe que l'absorption et la réflexion. La complexité du problème vient du fait que chaque particule diffuse la lumière, ce qui crée une multitude de faisceaux qui peuvent aussi diffuser sur la particule suivante et en générer encore plus. Donc, pour modéliser l'albédo, il faudrait suivre la propagation de tous ces faisceaux et calculer la réflectivité de chacun tout en tenant compte des autres phénomènes optiques.

Pour commencer, la diffusion de Rayleigh (36) s'applique que pour les petites particules nanoscopiques. À savoir, il faut que la particule soit beaucoup plus petite que la longueur d'onde considérée :

$$\beta = \frac{2 \pi r}{\lambda} \quad [1.8]$$

Avec β étant la fréquence relative de la circonférence sur la longueur d'onde, r le rayon de la particule (nm) et λ la longueur d'onde (nm) considérée. Lorsque $\beta \ll 1$, le recours au modèle de Rayleigh est justifié. Lorsque β s'approche de 1 ou qu'il lui est supérieur, le modèle de Rayleigh n'est plus applicable.

La relation suivante est la moyenne entre tous les angles de diffusion de l'intensité résultante :

$$I_d = I_0 \frac{2\pi^5 d^6}{3R^2 \lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \quad [1.9]$$

Avec, I_d et I_0 étant respectivement l'intensité diffusée et initiale en candela (cd), d le diamètre de la particule (nm), R la distance parcourue après la diffusion jusqu'à l'observateur (nm), λ la longueur d'onde (nm) et m est défini selon :

$$m = \sqrt{(n^2 + k^2)} \quad [1.10]$$

Où n et k sont respectivement l'indice de réfraction réel et l'indice de réfraction imaginaire.

Les paramètres clés de l'équation 1.9 sont la taille des particules d et la longueur d'onde λ qui sont respectivement d'ordre 10^6 et 10^{-4} . Donc, plus la particule possède un grand diamètre, plus la diffusion est accentuée. De même, ce sont les plus petites longueurs d'onde qui subissent le plus de diffusion.

Un autre exemple de la diffusion de l'eau est l'apparence du sable lorsqu'il est mouillé. Celui-ci s'assombrit parce que la diffusion propage la lumière dans le milieu ce qui augmente sa distance parcourue et augmente les chances qu'il y ait de l'absorption (35). Ainsi, même si l'eau contribue à une réflexion additionnelle, l'albédo des résidus de bauxite mouillés est légèrement plus faible.

Pour continuer, la diffusion des plus grosses particules est beaucoup plus complexe. Comme β (équation 1.8) s'approche de 1, le modèle de Rayleigh n'est plus valable. Le modèle de Mie (36) traite de la diffusion de ces particules. Il est populaire pour les appareils de DLS (*Dynamic Light Scattering*) qui permettent de déterminer la granulométrie des particules (37). Pour fonctionner, le modèle de Mie considère que les particules sont sphériques. Sinon, pour des particules non sphériques, le problème de la diffusion n'est pas résolu.

Une variable intéressante à suivre du modèle de Mie est le coefficient d'extinction $Q_{\text{extinction}}$ (38). Celui représente la somme de l'extinction due à la diffusion et l'absorbance pour une aire de surface. À partir de $\beta = 1$, la relation entre $Q_{\text{extinction}}$ et le diamètre de la particule devient sinusoïdale (16). Éventuellement, à mesure que β augmente, $Q_{\text{extinction}}$ converge vers une asymptote qui peut être estimée dans *Evans et al* (39).

La plupart des résidus de bauxite ont un $\beta > 1$ (leur taille varie entre 0,100 et 200 μm et la plage de travail est entre 350 et 2500 nm). Donc, pour la grande majorité de ces résidus, leur diamètre et la longueur d'onde n'affectent pas l'ampleur de la diffusion.

Pour conclure cette partie sur l'optique, le but a été de préparer le lecteur aux résultats des spectres d'albédo

présentés dans les prochains chapitres. Des conclusions sont tirées à partir des variations d'albédo de ceux-ci au cours de différentes expériences, variations qui sont causées par les phénomènes précédemment décrits. L'albédo est à priori généré par la réflexion de la lumière au fur et à mesure qu'elle se transmet au travers d'une surface. Plus il y a d'interférences dans cette transmission, par l'absorbance et la diffusion, plus l'extinction de la lumière est rapide, et moins la réflexion, donc l'albédo, est élevée.

Chapitre 2

Méthodologie

2.1 Mesures expérimentales de l'albédo avec un spectroradiomètre *Analytical Spectral Device* (ASD)

Les mesures d'albédo composent la majorité des expériences présentées dans les chapitres 3 et 4. Elles sont réalisées avec un spectroradiomètre (*Analytical Spectral Device*, *Full Range*, *Junior* ou ASD) de *Malvern Panalytical*. L'appareil est portable et peut être utilisé en laboratoire ou sur le terrain (figure 19). Son domaine d'application est entre 350 et 2500 nm avec une résolution de 1 nm. Lorsque l'appareil est en fonction, des mesures sont prises en continu avec une fréquence d'un nouveau spectre aux quelques secondes. Ainsi, l'expérimentateur peut s'assurer que l'albédo mesuré est stable d'un spectre à l'autre avant de procéder à un enregistrement.



Figure 19. Le spectroradiomètre *Analytical Spectral Device* est transportable dans un sac conçu pour les mesures extérieures

Le détecteur fait partie intégrante de l'ASD (figure 20). C'est un fil de fibre optique avec un manche noir. Un tube cylindrique doit y être attaché, celui-ci ajuste le champ de vision du détecteur. Deux types ont été utilisés soit 1° et 35° de champ de vision. Le premier est préféré pour les mesures laboratoire puisque les échantillons sont généralement de faibles diamètres et sont homogènes, donc si le champ de vision est trop grand, le détecteur récolterait de l'information erronée en dehors de la zone expérimentale. Pour les

mesures extérieures sur le terrain, un plus grand champ de vision est préféré (35°) puisqu'une très large zone constitue la surface d'intérêt et elle n'est pas nécessairement homogène. Donc, plus la surface de détection est grande, mieux les mesures représentent l'ensemble de la surface. Lors des mesures, il est important que le détecteur soit perpendiculaire à la surface analysée.

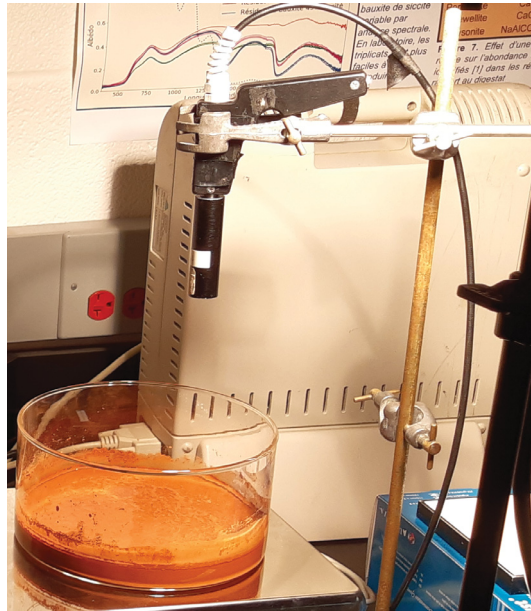


Figure 20. Le détecteur est le fil noir relié à l'ASD (fibre optique) qui finit en un manche auquel un cylindre est attaché pour ajuster le champ de vision

Un spectralon (figure 21) permet d'étalonner l'ASD. C'est une plaque blanche rugueuse qui réfléchit la totalité de la lumière dans le domaine établie dans toutes les directions. Autrement dit, son albédo est de 1,00 sur tout le spectre. Le protocole pour les mesures d'albédo avec l'ASD commence toujours par l'étalonnage avec le spectralon avant de réaliser une série de 3 ou 4 réplicats d'un échantillon. Avant de procéder au prochain échantillon, un autre étalonnage est accompli.

Le montage d'une expérience en laboratoire est très contrôlé par rapport aux expériences poursuivies à l'extérieur. D'abord, la source lumineuse est une lampe halogène incandescence parce que celle-ci émet dans le spectre visible et infrarouge contrairement à des lumières écoénergétiques conventionnelles qui éclairent faiblement dans le domaine infrarouge (40).

Pour une série de données, la distance avec la lampe doit rester la même (dans le cas présent, environ un mètre) afin que l'intensité lumineuse réfléchie soit constante. Dans le même ordre d'idée, la distance entre l'échantillon et le détecteur doit aussi rester la même (dans ce cas, environ 10 cm). Le détecteur est donc simplement fixé avec des pinces sur un support (voir figure 22 pour le montage). Sachant qu'il est très facile de refaire un étalonnage avec le spectralon, le montage doit être fixe entre deux étalonnages, mais peut être déplacé pour une nouvelle série de mesures.



Figure 21. Le spectralon est utilisé pour faire le blanc avant chaque mesure d'albédo

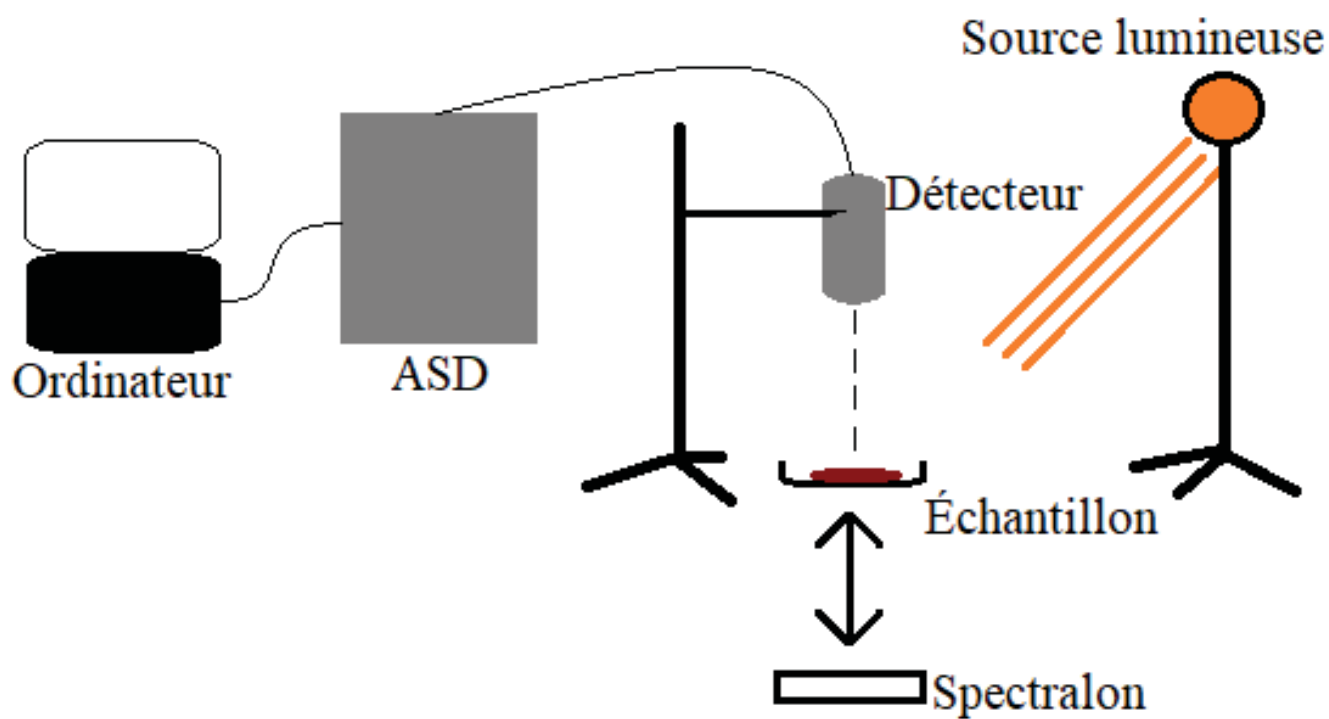


Figure 22. Montage en laboratoire pour des mesures avec l'ASD

Pour les mesures extérieures, la distance entre le détecteur et la surface d'intérêt (ou le spectralon) est moins importante puisque la source lumineuse (le soleil) est omniprésente. C'est-à-dire, contrairement à une lampe qui éclaire moins bien les objets éloignés, l'intensité du soleil est constante sous la perspective d'un expérimentateur qui se déplace à pied. Bien entendu, lors des mesures, les conditions météorologiques demandent une absence de nuages et les ombres sont à éviter. Aussi, les étalonnages doivent être fréquents (aux quelques minutes) puisque l'intensité reçue du soleil change au courant d'une journée. Le détecteur, tenu par l'expérimentateur, est généralement maintenu à hauteur de hanches.

Finalement, pour s'assurer de la reproductibilité, la quasi-totalité des résultats qui seront présentés ont été pris en plusieurs réplicats. Donc, pour un seul échantillon, à un instant donné, 3 ou 4 spectres étaient généralement enregistrés. D'un réplicat à un autre, ou bien le détecteur était déplacé (mesures extérieures) ou bien l'échantillon analysé était tourné d'environ 90° (mesures intérieures).

2.2 Préparation des échantillons de laboratoire à partir des résidus de bauxite

Ci-dessous, la méthode de préparation des échantillons analysés en laboratoire avec l'ASD est expliquée. Les résultats des expériences figurent dans le chapitre 3. Le matériel principal est des résidus de bauxite secs fournis par l'usine Vaudreuil de Rio Tinto, préalablement lavés et séchés, et qui correspondent aux caractéristiques énumérées dans le chapitre de la théorie. Par contre, même secs, il est attendu qu'il y a une petite quantité d'eau adsorbée sur la surface des résidus. En effet, des travaux connexes (41) ont démontré que pour des humidités relatives inférieures à 40%, le pourcentage d'eau adsorbée par rapport à la masse de résidus ne dépasse pas 3%. Un test rapide a démontré que, lorsque chauffés à 105°C, les résidus secs perdent environ 2% (l'eau adsorbée s'est évaporée).

Bref, trois types d'échantillons ont été confectionnés :

- Résidus de bauxite humides ;
- Résidus de bauxite congelés ;
- Neige contenant des résidus de bauxite.

Premièrement, les résidus de bauxite humides sont des résidus secs auxquels une quantité précise d'eau est ajoutée. Le tout est mélangé manuellement jusqu'à ce soit homogène. Connaissant la masse précise de résidus et d'eau, le taux de siccité peut être calculé :

$$TS = \frac{m_{\text{Résidus}}}{m_{\text{Résidus}} + m_{\text{eau}}} \times 100\% \quad [2.1]$$

Avec **TS**, le taux de siccité en % et **m**, la masse en résidus ou en eau.

Donc, le taux de siccité exprime le pourcentage de la portion solide des résidus miniers. L'eau adsorbée à la surface est négligée du calcul. Ceci introduit une erreur expérimentale variant entre 1% et 2% selon le taux de siccité ; plus l'échantillon contient de l'eau, moins l'erreur est importante.

Les premières expériences ont été réalisées avec des petites quantités d'échantillons (environ un gramme de résidus). Cela permet d'obtenir un produit homogène. Une fois préparé, il est conservé dans un contenant fermé. Lorsqu'il est temps de l'analyse avec l'ASD, l'échantillon est déposé dans un récipient (comme un pot de pétri) en dessous du détecteur tel que présenté dans la figure 22. Il est préférable que le mélange soit aplani sinon les formes incongrues pourraient affecter les angles d'incidence et de réflexion ce qui fausserait les valeurs d'albédo.

En deçà de 70% de siccité, il contient assez d'eau pour s'étaler naturellement dans le contenant. Entre

70% et 75%, il s'agglomère en grains et il faut l'écraser avec une spatule pour l'aplanir. Au-dessus de 75%, il est granuleux et s'étale facilement en secouant légèrement le récipient. Une évolution visuelle des résidus de bauxite en fonction de leur taux de siccité est démontrée dans la figure 23.

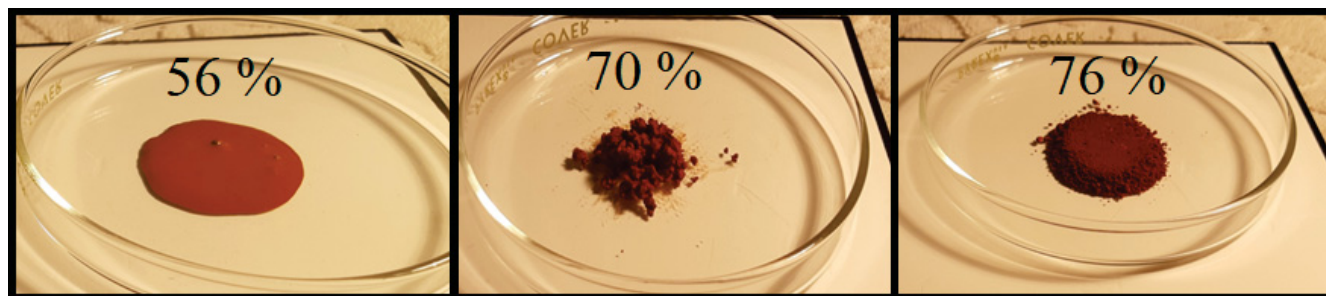


Figure 23. Apparence des résidus de bauxite humides pour 56%, 70% et 76% de taux de siccité

Le diamètre des échantillons doit être d'au moins de 2 cm pour que le détecteur au-dessus capte seulement de la lumière réfléchi par ceux-ci. L'épaisseur de l'échantillon n'a pas d'importance puisque la réflexion survient à la surface des toutes premières couches de l'échantillon ; la lumière s'éteint rapidement au travers des résidus de bauxite.

D'autres expériences, présentées plus loin dans le chapitre 3, ont exploré la spectroscopie sur une bien plus grande quantité de résidus de bauxite humides (plus de 400 grammes). La différence majeure est que leur homogénéité n'est pas assurée. En fait, l'objectif est de suivre, en laboratoire, l'évaporation libre d'une grande quantité de résidus. Ainsi, des comparaisons peuvent être faites avec l'évaporation dans les sites de disposition de l'usine. Par ailleurs, la cinétique d'assèchement des résidus de bauxite a été décrite dans des travaux connexes (41).

Deuxièmement, les résidus de bauxite congelés sont préparés de la même manière que précédemment. Une fois homogénéisé, l'échantillon est entreposé dans un congélateur à -4°C le temps d'une nuit. Il n'en sort que lorsque vient le temps de l'analyse sous l'ASD. L'analyse prend au maximum deux minutes et aucune fonte visible ne survient pendant ce court laps de temps.

Par ailleurs, un point intéressant est que les échantillons avec une siccité de 70% ou moins deviennent un bloc solide cohésif tandis que ceux de 75% ou plus restent granuleux (voir figure 24). Il y a donc un point critique entre 70% et 75% de taux de siccité où il n'y a plus assez d'eau pour assurer la cohésion des résidus. L'hypothèse est que, à haut taux de siccité, l'eau est maintenue dans les pores des résidus de bauxite et la concentration locale des résidus par rapport à l'eau y est élevée. Alors, les propriétés colligatives de cette solution concentrée font diminuer la température de congélation de l'eau (42). L'eau resterait à l'état liquide. Par contre, lorsque le taux de siccité diminue en dessous de 70%, l'eau est en assez grande quantité pour mouiller l'extérieur des résidus en gardant une concentration plus faible. Donc,

leurs propriétés colligatives causent une moindre diminution du point de congélation qui est insuffisante pour empêcher la congélation de l'eau.

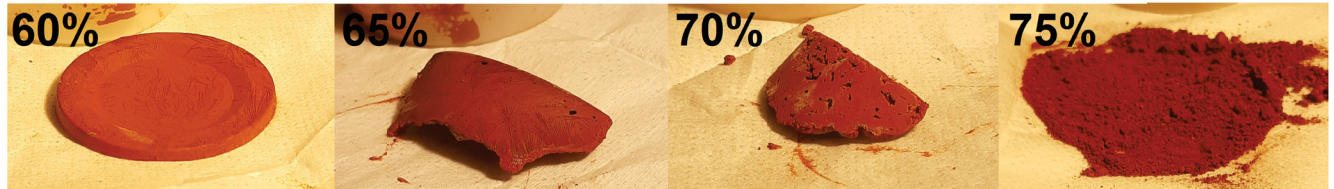


Figure 24. Évolution de l'apparence des résidus de bauxite congelés à -4°C pour 60%, 65%, 70% et 75% de taux de siccité

Et troisièmement, des échantillons de neige avec des résidus de bauxite ont été préparés. La méthode consistait à peser une quantité précise de résidus de bauxite (de 0,0100 gramme à 10 grammes) dans un sac de plastique vierge. Puis, à l'extérieur, lorsque la température est en dessous de 0°C , de la neige propre y est ajoutée (environ 60 grammes) et le tout est homogénéisé manuellement. Les échantillons sont conservés dans une boîte thermiquement isolée.

Lorsque vient le temps de l'analyse, le contenu du sac est pesé pour trouver la masse de neige utilisée, puis immédiatement analysé sous l'ASD. L'opération peut prendre jusqu'à trois minutes. Les échantillons semblent stables, mais les plus concentrés en résidus de bauxite semblaient légèrement fondus après l'analyse.

Finalement, la figure 25 démontre l'évolution de l'apparence des échantillons de neige selon leur teneur en résidus de bauxite. À partir de 0,459 mg/g, une contamination relativement faible, la neige a déjà une teinte rosée.

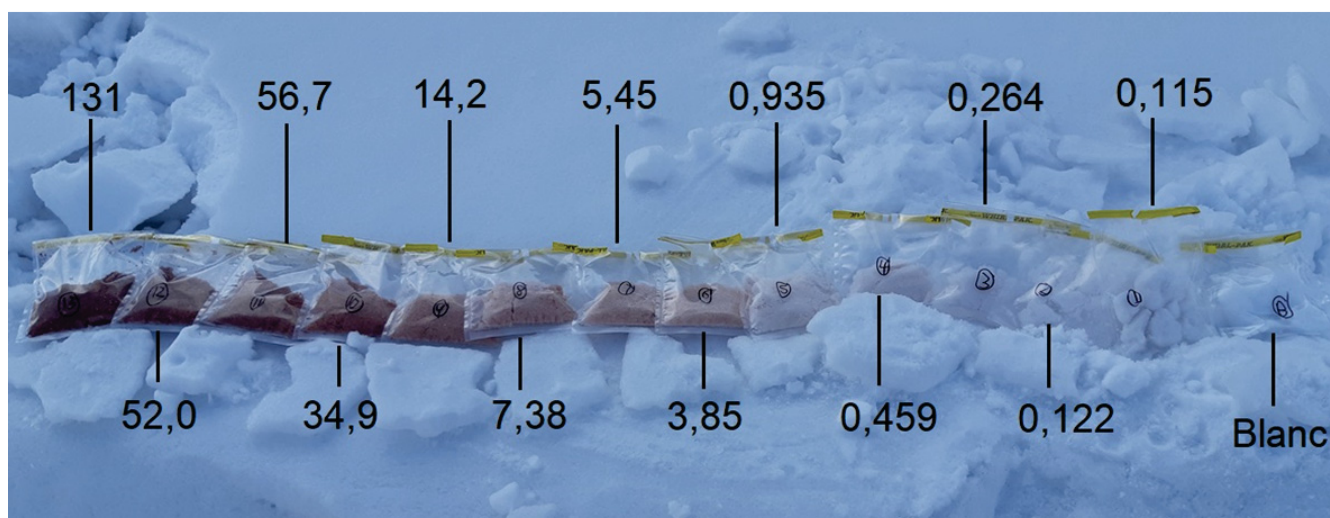


Figure 25. Préparation d'échantillons de neige avec différentes quantités de résidus de bauxite (les unités sont en nombre de milligrammes de résidus par gramme de neige soit des mg/g)

2.3 Modèle TARTES (*Two-stream Radiative TransfER in Snow model*)

Le modèle TARTES est utilisé dans le cadre du projet. C'est un outil computationnel qui calcule l'albédo de la neige en se basant sur TARTES et il est disponible pour la communauté scientifique (43). Ce modèle utilise l'approximation à deux faisceaux (*Two-stream Radiative Transfer*) (44) (45).

Il permet de générer des spectres d'albédo en fonction de variables telles que la surface spécifique (SS) de la neige ou l'ampleur de sa contamination par un certain composé. Par exemple, le noir de carbone ou l'hématite qui représente les résidus de bauxite. Un exemple d'utilisation du modèle TARTES est donné à la figure 26. Dans celle-ci, quelques courbes d'albédo ont été simulées en utilisant diverses surfaces spécifiques pour de la neige pure. Elles sont comparées à un spectre expérimental de neige.

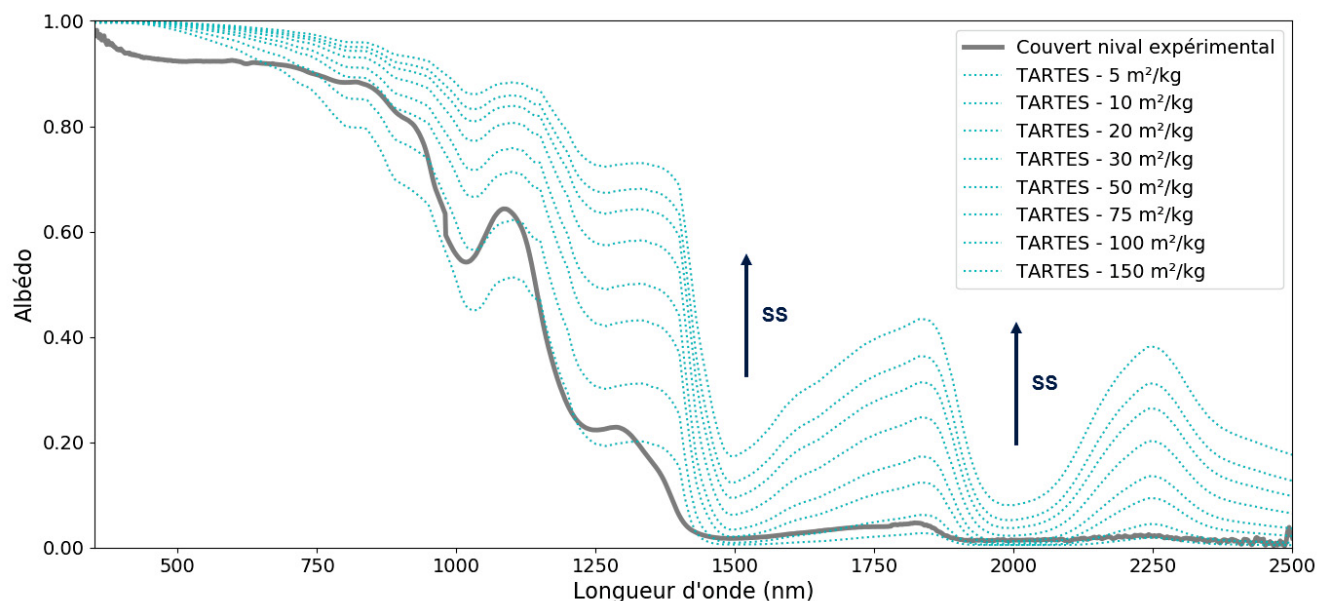


Figure 26. Exemples de simulations de l'albédo de couverts nivaux de différentes surfaces spécifiques (SS), comparativement à un couvert nival expérimental

Plus la surface spécifique est élevée, plus l'albédo augmente. À titre de référence, la surface spécifique de la neige varie entre 1,9 et 155,8 m²/kg (16). Plus la neige est fraîche, plus sa surface spécifique est élevée. Dans la figure 26, le spectre du couvert nival expérimental possède un âge de plusieurs journées. Comparativement aux simulations, sa SS se situe entre 5 et 20 m²/kg.

Le modèle se base sur l'approximation à deux faisceaux (*Two-stream Radiative Transfer*). Elle sert à simplifier le problème lorsqu'on considère la diffusion d'une surface (46). À savoir, seules deux directions

sont prises en compte, soit les deux sens (un étant opposé à l'autre) qui sont perpendiculaires à la surface du milieu étudié. Un est le faisceau qui diffuse de l'avant et l'autre par en arrière (rétrodiffusion).

Avec cela, le paramètre d'asymétrie g est introduit. Il peut prendre une valeur entre -1 et 1 :

- Si $g = -1$, la diffusion vers l'avant est totale ;
- Si $g = 0$, les deux faisceaux sont égaux ;
- Si $g = 1$, la rétrodiffusion est totale.

Pour les résidus de bauxite dans la neige, la valeur de g est incertaine, mais devrait se situer entre 0 et 1. Dans ce domaine, les faisceaux lumineux diffusent plus vers l'avant que vers l'arrière ce qui a pour effet de diminuer l'albédo de la neige contaminée (35).

Chapitre 3

Détermination des taux de siccité dans les résidus de bauxite

Un des buts du projet est de vérifier la relation entre l'albédo des résidus de bauxite et leur teneur en eau. Rappelons que la force capillaire de l'eau (figure 3) joue un rôle important dans la rétention des poussières fugitives au site de disposition des résidus de bauxite (SDRB). En étudiant cette relation, on veut vérifier si les quantités d'eau dans les résidus peuvent être calculées par leur spectre d'albédo. De même, ces spectres d'albédo pourraient aussi contenir de l'information pertinente qui aiderait à l'élaboration d'un indice de risque de l'emportement des poussières.

Ce chapitre traite de l'analyse spectrale en laboratoire des résidus de bauxite humides et congelés en explorant comment la spectroscopie pourrait être une méthode de détermination de leur taux de siccité. Puis, cette méthode est comparée à une autre, plus traditionnelle, soit la gravimétrie. Enfin, des expériences de validation sont effectuées sur le terrain au SDRB.

3.1 Analyse spectroscopique des résidus de bauxite humides

Dans cette partie, plusieurs échantillons de résidus de bauxite humides sont analysés avec un ASD. Les échantillons ont été préparés en ajoutant différentes quantités d'eau précises à des résidus de bauxite secs, comme expliqué dans le chapitre de la méthodologie. Ainsi, différents taux de siccité sont obtenus (équation 2.1). Avec le montage de l'ASD, aussi expliqué dans la méthodologie, leur albédo entre 350 et 2500 nm est mesuré. L'idée est de suivre l'évolution des spectres d'albédo des résidus de bauxite avec des taux de siccité variant entre 45% et 100%. Ci-dessous, les spectres d'albédo sont présentés, le traitement des données est expliqué et des droites d'étalonnage sont construites pour démontrer la relation entre l'albédo et les taux de siccité.

Les spectres bruts obtenus sont présentés à la figure 27. Plus la quantité d'eau augmente (le taux de siccité descend), plus l'albédo tend à diminuer. L'atténuation est causée par la diffusion de l'eau et par son absorbance à des longueurs d'onde précises. Les deux zones d'absorbance les plus évidentes sont vers 1450 et 1925 nm correspondants respectivement aux bandes $2\nu_{1,3}$ et $\nu_{1,3} + \nu_2$.

À partir de ces spectres, il serait intéressant de construire des droites d'étalonnage qui vérifient la relation de l'albédo en fonction du taux de siccité des résidus à 1450 et 1925 nm. Normalement, il est attendu que

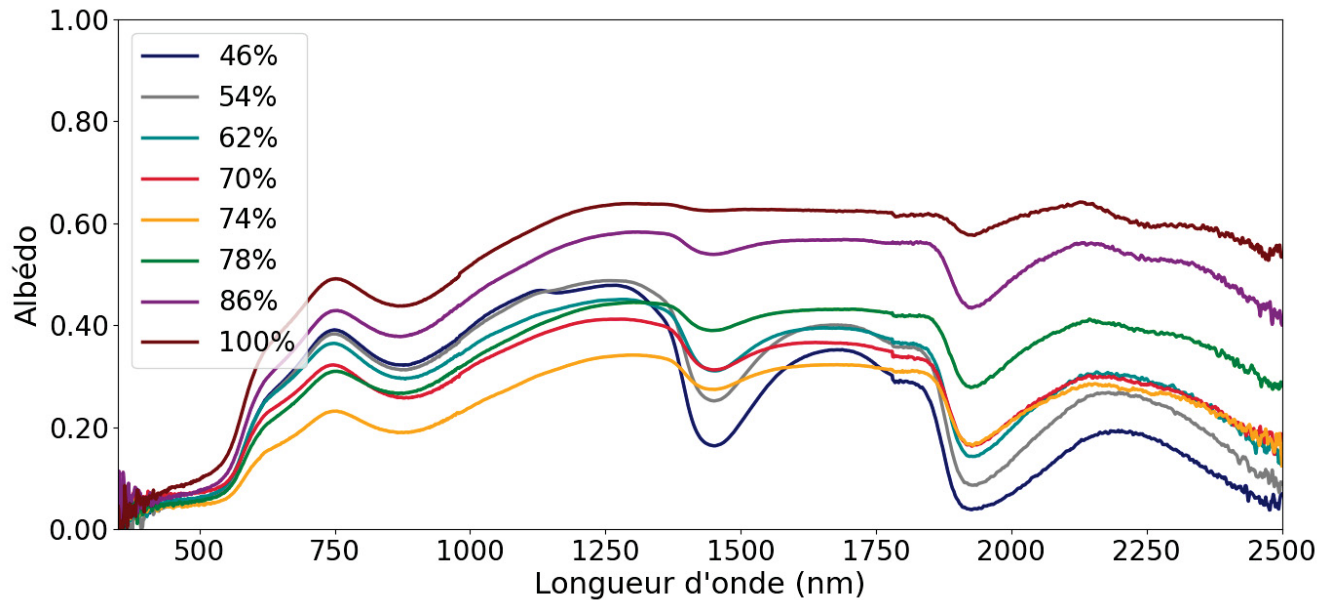


Figure 27. Spectres d'albédo de résidus de bauxite humides avec des taux de siccité variables analysés en laboratoire avec un ASD

L'albédo augmente à mesure que le taux de siccité augmente à cause du retrait de l'eau. Cependant, à la vue des spectres de la figure 27, ce n'est pas le cas pour les échantillons de 62% et 70% qui ont un albédo très similaire surtout à 1450 et 1925 nm. Plus problématique encore, leur albédo est supérieur à celui de l'échantillon de 74% surtout à 1450 nm.

Le problème semble être par rapport à la morphologie des échantillons de 70% et 74%. À la figure 23, il avait été démontré que dans cet intervalle de taux de siccité, les résidus étaient agglomérés et formaient des formes grossières. Bien que tous les échantillons sont aplatis pour favoriser la réflexion de la lumière incidente, ces deux échantillons semblent tout de même avoir des formes plus incongrues et rugueuses. Le différent relief, qui n'est pas plat, change l'angle de réflexion et affecte les résultats, comme expliqué dans la partie sur la réflexion de Fresnel dans le chapitre de la théorie.

Donc, pour construire les droites d'étalonnage, les données d'albédo ne sont pas utilisées telles quelles. Elles peuvent varier de manière imprévisible à cause de l'agglomération de certains échantillons. Cette forme qu'ils prennent est un paramètre difficile à contrôler en laboratoire et encore plus sur le terrain. Idéalement, l'albédo ne varierait que par la quantité d'eau mise dans les échantillons. Pour cela, un traitement des données devient nécessaire. L'opération clé du traitement des données est une normalisation des spectres d'albédo à 1250 nm. En d'autres mots, tous les points d'un spectre sont maintenant exprimés par le ratio de leur albédo initial par rapport à celui mesuré à 1250 nm. On obtient une mesure de l'albédo relatif :

$$Alb\acute{e}do\ relati\acute{f}_{\lambda} = Alb\acute{e}do_{\lambda} / Alb\acute{e}do_{1250nm} \quad [3.1]$$

Avec λ représentant un point pour une certaine longueur d'onde.

La figure 28 est le résultat de cette opération de normalisation. Les problèmes évoqués par rapport au désordre des échantillons qui apparaissent dans la figure 27 sont résolus. À la place, les échantillons apparaissent en ordre croissant de taux de siccité dans les régions des bandes d'absorption de l'eau à la figure 28.

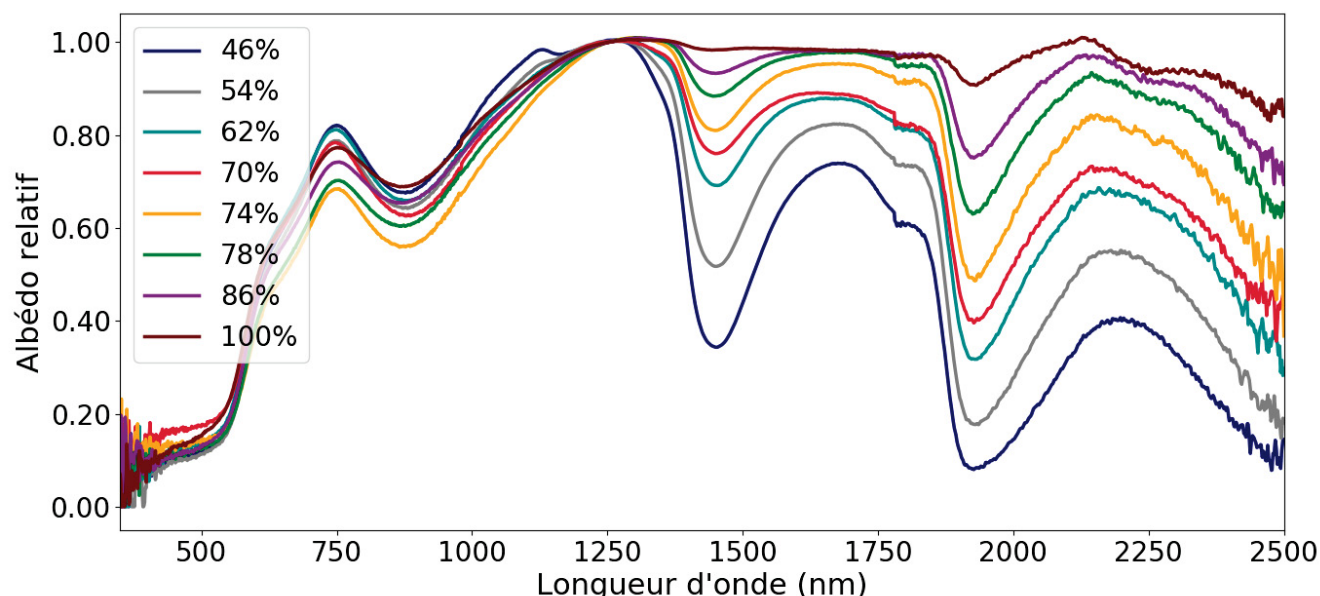


Figure 28. Spectres d'albédo normalisés à 1250 nm de résidus de bauxite humides de siccités variables (normalisation à 1250 nm)

Le succès de la normalisation repose sur l'utilisation d'une référence (l'albédo à 1250 nm) où il y a un albédo plus stable puisque l'absorption par l'eau y est modeste par rapport aux bandes IR. Ainsi, l'albédo relatif à une de ces bandes IR représente l'atténuation du signal causée par l'absorption de l'eau. Si l'albédo est affecté par la forme des échantillons ou tout autre paramètre imprévu, la variation devrait se refléter sur tout le spectre y compris à la longueur d'onde de référence. Par exemple, si la source lumineuse était substituée à une autre moins puissante, sans refaire l'étalonnage de l'ASD, le nouveau spectre d'albédo obtenu verrait tous ses points diminués d'un certain pourcentage. Or, l'albédo relatif calculé pour ce spectre hypothétique resterait le même ; l'erreur s'annule avec l'équation 3.1.

Bref, le but est de construire des droites d'étalonnage qui ont une allure linéaire et qui expliquent le comportement de l'albédo en fonction de la quantité d'eau dans les échantillons. En utilisant l'albédo relatif, une valeur de 1 signifierait que le point à la longueur d'onde choisie a le même albédo que la

référence alors qu'à 0,5, il serait de moitié. Les droites d'étalonnage construites sont faites en choisissant une longueur d'onde précise. En sélectionnant une qui est incluse dans une bande d'absorption de l'eau, ce but devrait être atteint soit que, à mesure que de l'eau est ajoutée, il y a une diminution directe de l'albédo relatif.

D'ailleurs, il va de soi que plusieurs longueurs d'onde auraient pu être utilisées comme référence ; celle à 1250 nm a été choisie parce que l'albédo y est maximal pour la majorité des échantillons. Donc, les spectres normalisés restent compris entre 0 et 1 sur l'axe vertical.

Avec l'opération de normalisation, les droites d'étalonnage sont tracées. Une a été construite pour la bande $2\nu_{1,3}$ (à 1450 nm) et une autre pour la bande $\nu_{1,3} + \nu_2$ (à 1925 nm). Ces deux zones sont idéales puisqu'elles sont très sensibles à la teneur en eau dans les échantillons. Les droites d'étalonnage sont présentées à la figure 29 et mettent en relation l'albédo relatif à 1450 nm et à 1925 nm (par rapport à une référence à 1250 nm) en fonction du taux de siccité de différents échantillons. Les barres d'erreur représentent l'écart-type entre les répliquats des différentes mesures pour un même point. Les deux droites d'étalonnage ont une excellente progression linéaire. Dans les deux cas, il y a toujours une augmentation appréciable de l'albédo de points en points. Ceci est prometteur pour la détermination de taux de siccité inconnus par la télédétection de surfaces.

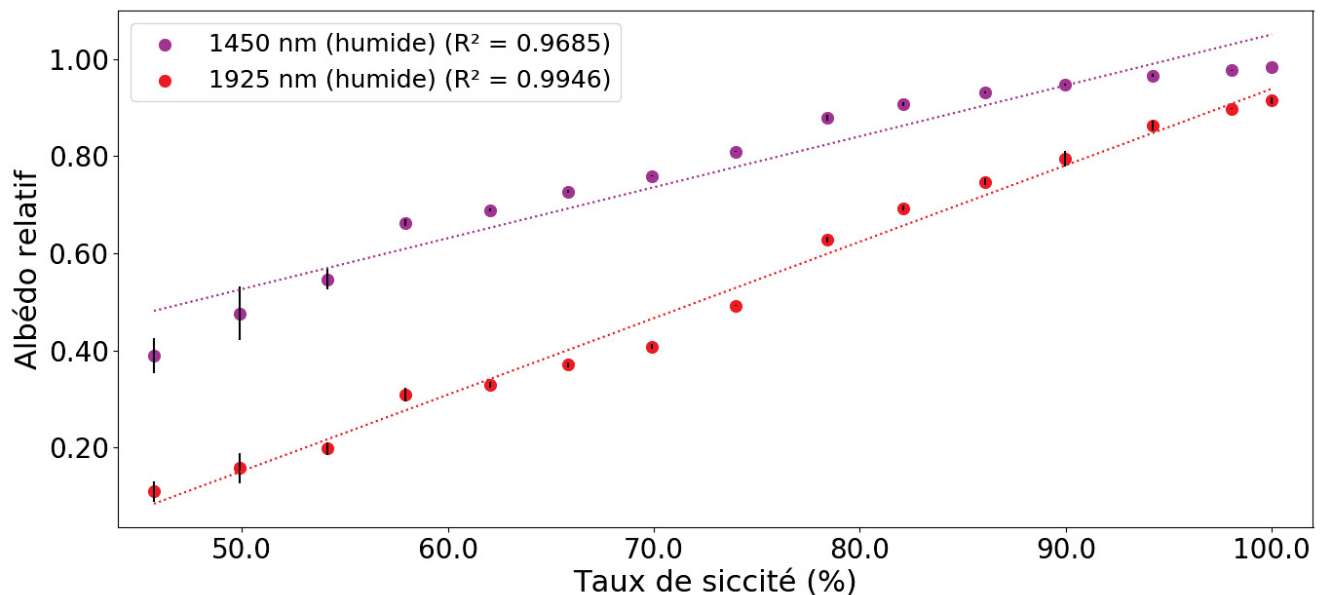


Figure 29. Étalonnage de l'albédo aux bandes $2\nu_{1,3}$ (1450 nm) et $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1925 nm) par rapport à celui de la référence (1250 nm) en fonction des taux de siccité des résidus de bauxite humides

La deuxième courbe (1925 nm) a un plus grand taux de variation puisque sa bande d'absorption est un peu plus intense que celle retrouvée à 1450 nm. Les deux courbes convergent à mesure que les taux de

siccité augmentent. Le domaine de linéarité optimal est entre 50% et 100%. En deçà de 50%, la présence du surnageant modifie la relation entre le taux de siccité et l'albédo. De toute façon, le taux de siccité minimal des boues rouges qui sortent de l'usine est supérieur à 50%.

Les paramètres des droites d'étalonnage (pente, ordonnée à l'origine et coefficient de corrélation R^2) sont donnés au tableau 2.

D'abord, le R^2 de la première bande $2\nu_{1,3}$ est de 0,9685 ce qui est plutôt bas selon des standards de chimie analytique. Les points de cette courbe dévient entre 50% et 60% ainsi qu'entre 90% et 100%. Dans la première situation, il y a assez d'eau pour que les résidus soient en suspension, ce qui pourrait atténuer davantage l'albédo par la diffusion. Dans la deuxième situation, les taux de siccité sont surestimés puisque l'eau adsorbée est négligée. Or, comme il a été expliqué dans la méthodologie, les résidus secs pourraient être considérés à 97-98 % de siccité. Il serait possible d'obtenir une meilleure corrélation en prenant une zone plus restreinte comme entre 60% et 90%.

Tableau 2. Paramètres des droites d'étalonnage des résidus de bauxite humides provenant de la figure 29

	Bande $2\nu_{1,3}$ (1450 nm)	Bande $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1925 nm)
Pente ($\%^{-1}$)	$0,01048 \pm 0,00075$	$0,01574 \pm 0,00045$
Ordonnée	$0,002 \pm 0,057$	$-0,635 \pm 0,034$
R^2	0,9685	0,9946

Pour ce qui est de la deuxième courbe de la bande $\nu_{1,3} + \nu_2$, son R^2 est supérieur avec 0,9946. Sa courbe est en effet plus linéaire que l'autre. Elle semble avoir une légère dépression aux alentours de 70% ; c'est dans cette région que les échantillons aux formes incongrues se retrouvent.

Une analyse des résidus de la régression a été réalisée pour les deux droites d'étalonnage présentées ci-dessus. Les représentations graphiques de cette analyse sont dans l'annexe. Les résidus pour la régression de la bande $2\nu_{1,3}$ (1450 nm) sont dans la figure 51a et ceux de la bande $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1925 nm) sont dans la figure 51b.

Dans le premier cas, pour la bande à 1450 nm, les résidus de la régression forment une cloche (figure 51a). Cela révèle qu'une modélisation linéaire n'est pas tout à fait appropriée pour représenter l'évolution de l'albédo en fonction des taux de siccité. Une tendance non linéaire, donc courbée, serait idéale pour représenter ces données. Une autre solution serait d'utiliser plus qu'une droite d'étalonnage pour représenter différents intervalles de taux de siccité. Ainsi l'intervalle des taux de siccité à évaluer serait restreint.

Certes, pendant le cycle d'assèchement des résidus de bauxite, d'une durée de quelques années, leur taux

de siccité varie considérablement. Il est d'initialement de 50-60% et va jusqu'à atteindre 75-85%. Ceci dit, le site de disposition des résidus de bauxite est séparé par secteurs et chaque partie individuelle va avoir un bilan hydraulique différent. L'intervalle du taux de siccité retrouvé à un moment donné dans un secteur précis est généralement plutôt faible ; il serait très surprenant que l'écart soit plus haut que 10%.

Également, un des objectifs derrière le développement de cette méthode est de prévenir les emportements de poussières. Selon les conditions météorologiques, il y a un taux de siccité critique où le risque d'emportement des poussières commence (figure 3). Par leurs expériences antérieures, le personnel de l'usine commence à prendre des précautions si les résidus ont une siccité aux alentours de 75%. Ainsi, la plage de l'étalonnage pourrait, par exemple, être restreinte entre 65% et 85%. Cela augmenterait la fiabilité de la droite d'étalonnage.

Et dans le deuxième cas, pour la bande à 1925 nm, les résidus de la régression ont une bonne distribution aléatoire des deux côtés de l'axe des abscisses (figure 51b). Ce n'est pas une distribution parfaite, par exemple, le résidu du point à 70% est un peu éloigné. Mais, cela renforce le fait que l'utilisation d'une régression linéaire est appropriée pour ce cas-ci.

Pour terminer cette discussion, les incertitudes de la méthode sont soulevées. Le but ultime de ce chapitre est de vérifier si la méthode développée permet d'analyser des surfaces mouillées par télédétection. En mesurant leur spectre d'albédo à distance, il serait possible de calculer leur taux de siccité. À quel point cette méthode serait-elle précise et fiable ? La précision dépend de l'erreur sur la mesure. Cette dernière dépend de l'écart-type du signal d'albédo entre des réplicats.

Pour la calculer, rappelons d'abord que les droites d'étalonnage ont été tracées selon un modèle linéaire, soit :

$$y = mx + b \quad [3.2]$$

Avec **y** comme le signal de l'albédo mesuré, **m** la pente en %⁻¹, **x** le taux de siccité en % et **b** l'ordonnée à l'origine. Puis, pour déterminer le taux de siccité des réplicats d'un inconnu dont l'albédo a été mesuré, il suffit d'utiliser :

$$x = \frac{y - b}{m} \quad [3.3]$$

Une fois les taux de siccité connus, l'écart-type du taux de siccité des réplicats peut être calculé. Celui-ci est directement relié à l'écart-type du signal de l'albédo. Ce dernier est généralement de l'ordre de 0,01 ou moins. Cela se traduit par un écart-type d'environ 1% de siccité.

Puis, l'intervalle de confiance à 95% peut être déduit. Pour des mesures faites dans la région de 70% taux de siccité, la variation des résultats peut atteindre $\pm 3,0\%$ et $\pm 1,2\%$ pour la droite d'étalonnage à 1450 nm et 1925 nm respectivement. Il y a une plus grande variation pour la courbe à 1450 nm puisque l'erreur sur sa régression est plus élevée (voir tableau 2).

Si la méthode est utilisée pour déterminer le risque d'emportement des poussières, l'incertitude sur les calculs forcerait qu'il y ait un tampon de 1% ou de 3%. C'est-à-dire, si le personnel de l'usine de Vaudreuil juge que le risque d'emportement commence à 75% de taux de siccité, un résultat de 72% ou de 74% produit avec cette méthode déclencherait des procédures préventives faces aux emportements de poussières. D'un point de vue pratique, la méthode est assez précise pour que ces procédures soient nécessaires.

Pour résumer cette partie, des échantillons de résidus de bauxite humides ont été préparés en laboratoire. En analysant leur albédo, des droites d'étalonnage ont été construites. La corrélation entre l'albédo et les taux de siccité des résidus est bonne et exploitable. La droite réalisée à partir de la bande à 1950 nm avait un meilleur R^2 que celle à 1425 nm (0,9946 contre 0,9645).

Par contre, l'analyse des résidus de la régression révèle qu'elles ne sont pas parfaitement linéaires entre 45% et 100% de taux de siccité. Cependant, la réalité aux sites de disposition est que l'intervalle des taux siccité est restreinte à une plage d'environ 10% pour un moment donné. Alors, il serait possible d'avoir une méthode beaucoup plus précise si les droites d'étalonnage sont refaites en fonction de la situation. Malgré cela, les droites d'étalonnage tracées (figure 29) serviraient comme une référence pour situer les nouveaux points par rapport à l'ensemble des points entre 45% et 100%.

L'application de la méthode sur le terrain pourrait avoir deux axes. Le premier serait le suivi de l'évaporation des résidus de bauxite qui fait partie des travaux de routine de l'usine. Le deuxième serait d'évaluer le risque d'emportement des poussières. Avec la méthode discutée, les analyses spectroscopiques pourraient être corrélées avec les observations faites sur le terrain. Cela permettrait de mieux cerner quand et sous quelles conditions les événements d'emportements se produisent.

3.2 Analyse spectroscopique des résidus de bauxite congelés

Considérant que le SDRB est sujet aux intempéries de l'hiver, il convient de vérifier la relation de l'albédo selon les différents taux de siccité pour des résidus de bauxite congelés. Rappelons aussi que la sublimation de la glace en hiver est possible (7), ce qui fait varier le taux de siccité. Également, les emportements de poussières font des événements marquants en hiver (figure 2).

Le même processus est appliqué pour le développement de la méthode que la partie précédente. Donc des droites d'étalonnage sont encore construites. De plus, l'effet de cette congélation sur l'allure des spectres d'albédo est exploré.

La préparation des échantillons est décrite dans le chapitre de la méthodologie. C'est-à-dire, une quantité d'eau précise est ajoutée à des résidus secs, suivi d'une nuit dans un congélateur à -4°C . Les spectres d'albédo subséquentment obtenus seront présentés plus loin (figure 32). Pour l'instant, la discussion porte sur les droites d'étalonnage obtenues et leurs paramètres vis-à-vis à celles des résidus de bauxite humides.

La figure 30 représente l'albédo relatif des deux bandes $2\nu_{1,3}$ (à 1450 nm) et $\nu_{1,3} + \nu_2$ (à 1975 nm) par rapport à l'albédo à 1250 nm en fonction des taux de siccité. Les barres d'erreur représentent encore l'écart-type entre les répliquats de mesures pour un point. Encore une fois, la corrélation est très bonne. Le domaine de linéarité est entre 50% et 100%. Les paramètres de la pente, de l'ordonnée à l'origine et du R^2 sont très similaires à ceux précédemment observés (voir tableau 3).

Tableau 3. Paramètres des droites d'étalonnage des résidus de bauxite congelés provenant de la figure 30

	Bande $2\nu_{1,3}$ (1475 nm)	Bande $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1950 nm)
Pente ($\%^{-1}$)	$0,01143 \pm 0,00074$	$0,01391 \pm 0,00085$
Ordonnée	$-0,107 \pm 0,057$	$-0,508 \pm 0,065$
R^2	0,9814	0,9836

Les coefficients de corrélation R^2 sont de 0,9814 et 0,9836 pour les bandes $2\nu_{1,3}$ et $\nu_{1,3} + \nu_2$ respectivement ce qui est satisfaisant. Il semble encore y avoir une dépression de l'albédo aux alentours de 70% de siccité. En effet, les échantillons de 65% et 70% étaient de formes convexes (voir figure 24), ce qui change l'angle de réflexion. Il est difficile de les aplanir puisque, avant la congélation, ces échantillons s'agglomèrent. Ils ont une certaine consistance qui les empêche de s'étaler pour remplir l'espace disponible. C'est à partir de 75% où l'échantillon est granuleux et qu'il peut être aplani pour optimiser la réflexion. En fait, il est impossible de différencier visuellement les échantillons humides ou congelés de 75% de taux de siccité et plus (voir figures 23 et 24).

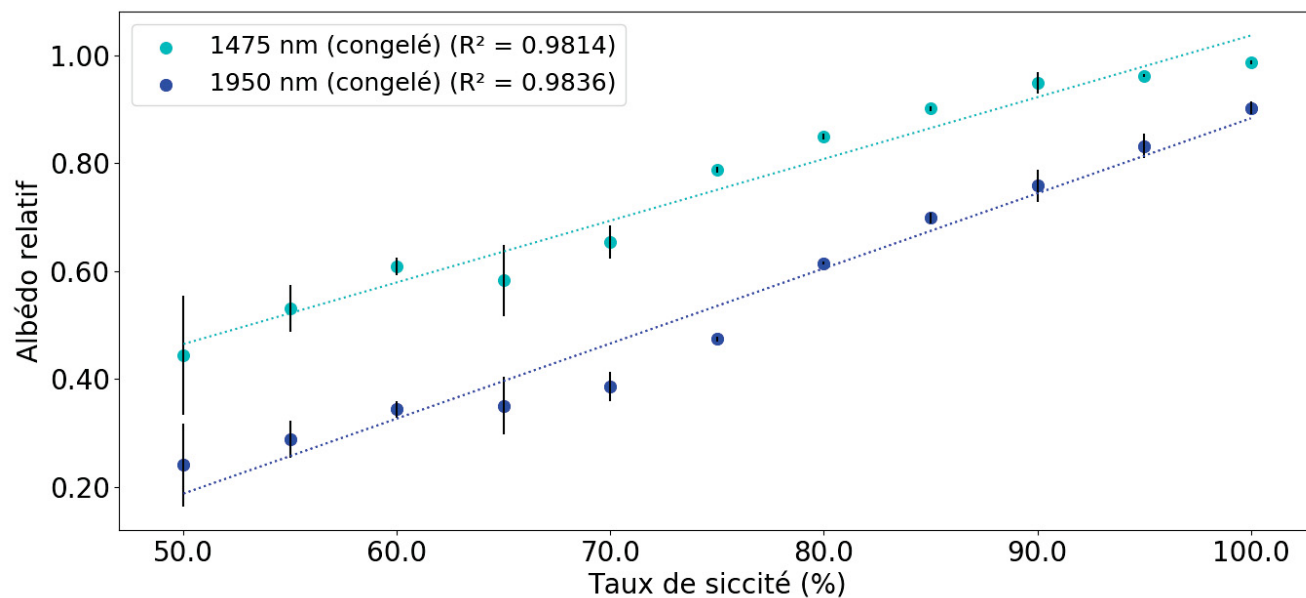


Figure 30. Étalonnage de l'albédo aux bandes $2\nu_{1,3}$ (1475 nm) et $\nu_{1,3} + \nu_2$ (1950 nm) par rapport à celui de la référence (1250 nm) en fonction des taux de siccité des résidus de bauxite congelés

Les analyses des résidus des régressions ont aussi été réalisées (voir les figures 52a et 52b de l'annexe). La distribution des points n'est pas parfaitement aléatoire. Par exemple, les résidus qui sont proches de 70% de taux de siccité se retrouvent majoritairement en bas de l'axe horizontal. Cela est en accord avec l'observation faite pour les échantillons de 70%. Également, il serait encore pertinent d'utiliser une plage d'étalonnage restreinte selon l'humidité des résidus de bauxite sur le terrain.

Bref, les courbes des résidus de bauxite humides ou congelés sont très similaires. Il suffit d'observer la figure 31 qui est la comparaison directe de toutes les droites d'étalonnage construites jusqu'à maintenant. Pour une paire de courbes qui partage la même bande d'absorption de l'eau, leur hauteur est similaire et elles sont presque parallèles.

3.2.1 Informations spectroscopiques complémentaires révélant la morphologie des résidus de bauxite

Les prochains paragraphes demandent un rappel sur certains éléments soulevés dans le chapitre de la méthodologie et de la théorie. D'abord, par rapport à la préparation des échantillons de résidus de bauxite congelés, il avait été observé que pour 70% de taux de siccité et moins, les résidus congelés formés sont compacts comme un cube de glace. Cependant, à 75% de taux de siccité et plus ils restent granuleux et

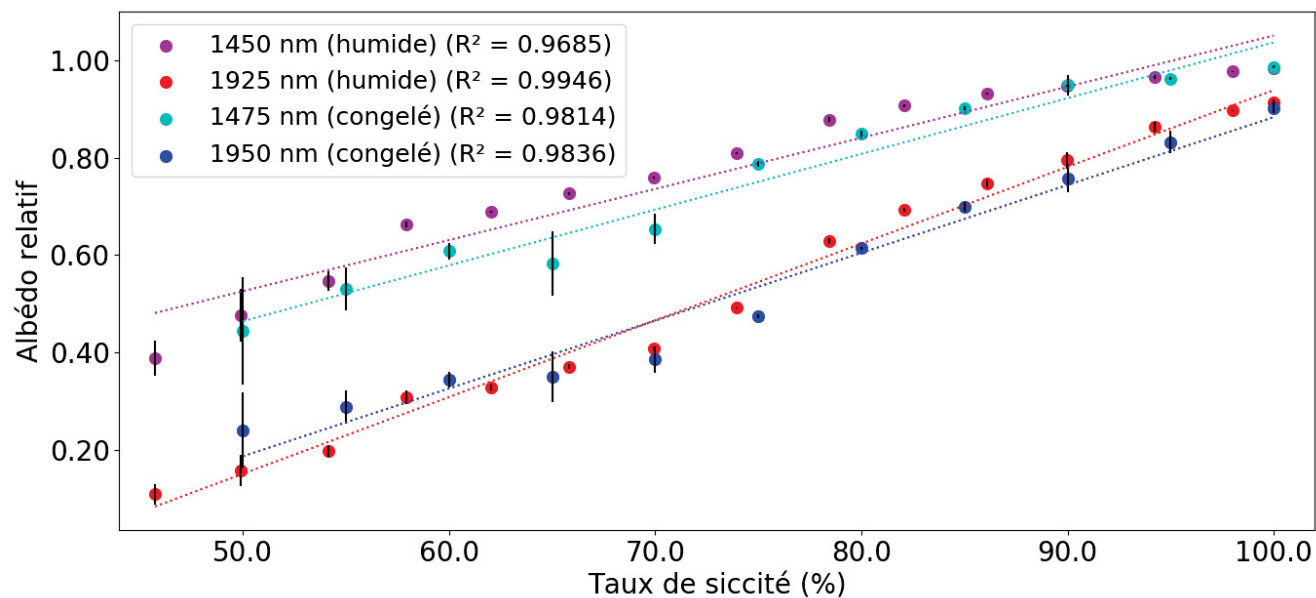


Figure 31. Comparaison des droites d'étalonnage de l'albédo aux bandes $2\nu_{1,3}$ et $\nu_{1,3} + \nu_2$ par rapport à celui à 1250 nm en fonction des taux de siccité des résidus de bauxite humides et congelés

friables (figure 24). L'hypothèse soulevée était par rapport aux propriétés colligatives qui abaisseraient le point de congélation de l'eau, surtout si elle est contenue dans les pores des résidus.

Puis, dans le chapitre de la théorie, il avait été noté que les bandes d'absorption de l'eau $2\nu_{1,3}$ et $\nu_{1,3} + \nu_2$ sont décalés vers les plus grandes longueurs d'onde à mesure que la température diminue et surtout si l'eau se solidifie. Donc, en combinant ces deux informations, l'hypothèse est que les échantillons de résidus de bauxite solides (70% et moins) voient leurs bandes IR décaler vers les plus grandes longueurs d'onde contrairement aux échantillons granuleux (75% et plus).

Cette dernière information est vérifiable avec les spectres d'albédo des échantillons de résidus de bauxite congelés présentés à la figure 32. Il y a une démarcation claire de la position où l'albédo est minimal, selon les taux de siccité, pour les deux bandes $2\nu_{1,3}$ et $\nu_{1,3} + \nu_2$.

En étudiant un peu plus les spectres, on remarque que l'échantillon de 70% a des bandes IR plus larges que celles de 75%. Considérons la chose suivante : ces deux échantillons ont des pores avec de l'eau liquide (absorbance vers 1450 et 1925 nm), mais seul l'échantillon de 70% possède de la glace à sa surface (absorbance vers 1475 et 1950 nm). Alors les échantillons de 70% et moins ont des bandes plus larges parce que leurs eaux sont dans deux états différents (liquide et solide) qui absorbent l'infrarouge à des longueurs d'onde légèrement différentes. Tandis que les échantillons de 75% et plus n'ont que de l'eau liquide et leurs bandes sont plus minces.

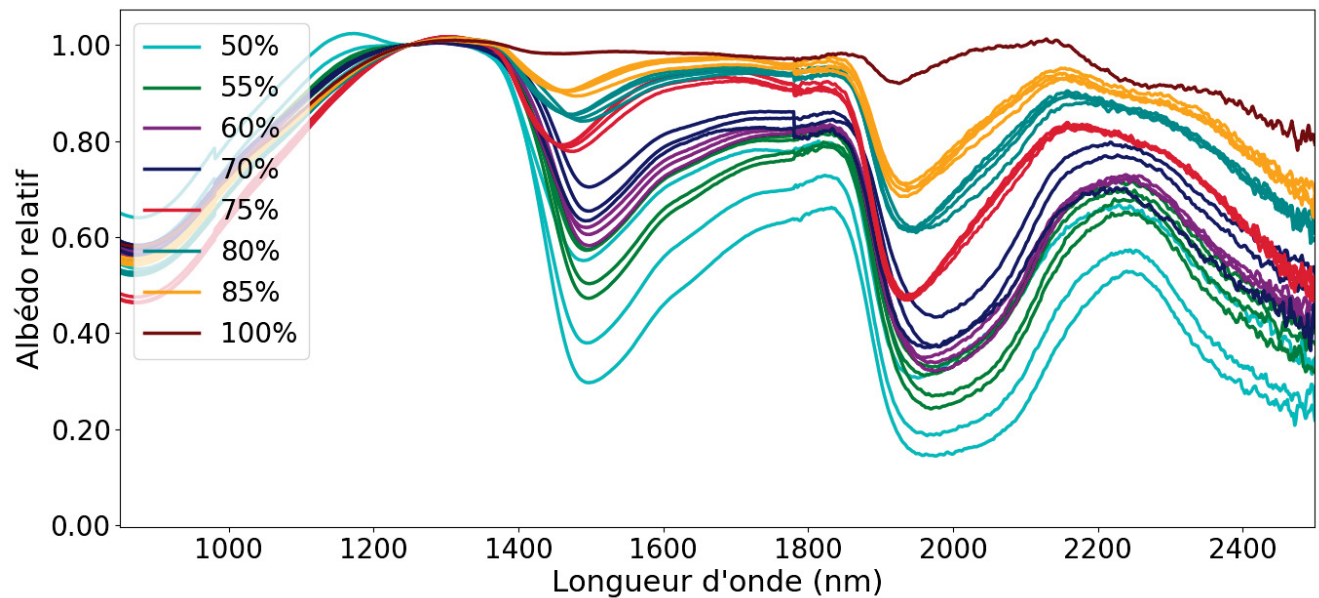


Figure 32. Spectres d'albédo normalisés à 1250 nm de résidus de bauxite congelés de siccités variables

Nonobstant, il y a clairement une différence spectroscopique entre les échantillons congelés de haut taux de siccité vis-à-vis à ceux de bas taux de siccité qui restent granuleux. Il suffit de relever les longueurs d'onde où l'albédo est minimal dans une bande d'absorbance IR en fonction du taux de siccité (voir figure 33 et 34 ainsi que le tableau 4). Sitôt passé le point critique entre 70% et 75%, cette longueur d'onde du point minimum change.

Dans l'optique du projet sur l'emportement des poussières, il est évident que ce sont les résidus de bauxite granuleux, à partir de 75% de siccité qui sont les plus à risque. Cela ne veut pas dire que leur emportement est assuré, puisque la petite portion d'eau contribue à alourdir les particules et à légèrement les agglomérer (47). Encore une fois, l'application de la méthode pourrait aider à mieux comprendre sous quelles conditions les emportements surviennent.

Les droites d'étalonnage ont démontré qu'il était possible d'estimer les taux de siccité des résidus de bauxite. De plus, les informations spectroscopiques complémentaires ont l'avantage de décrire la morphologie des résidus de bauxite. C'est-à-dire, s'ils sont granuleux ou s'ils sont emprisonnés dans une matrice de glace.

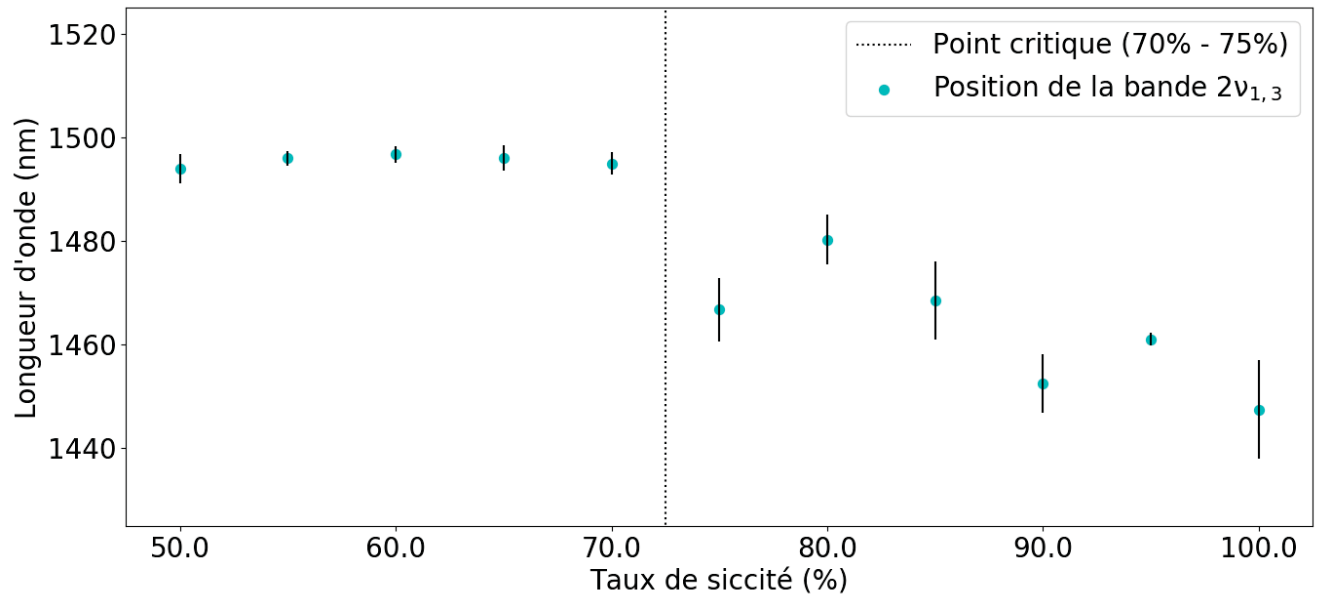


Figure 33. Comparaison des longueurs d'onde observées où l'albédo est au plus faible pour la bande $2\nu_{1,3}$ en fonction du taux de siccité

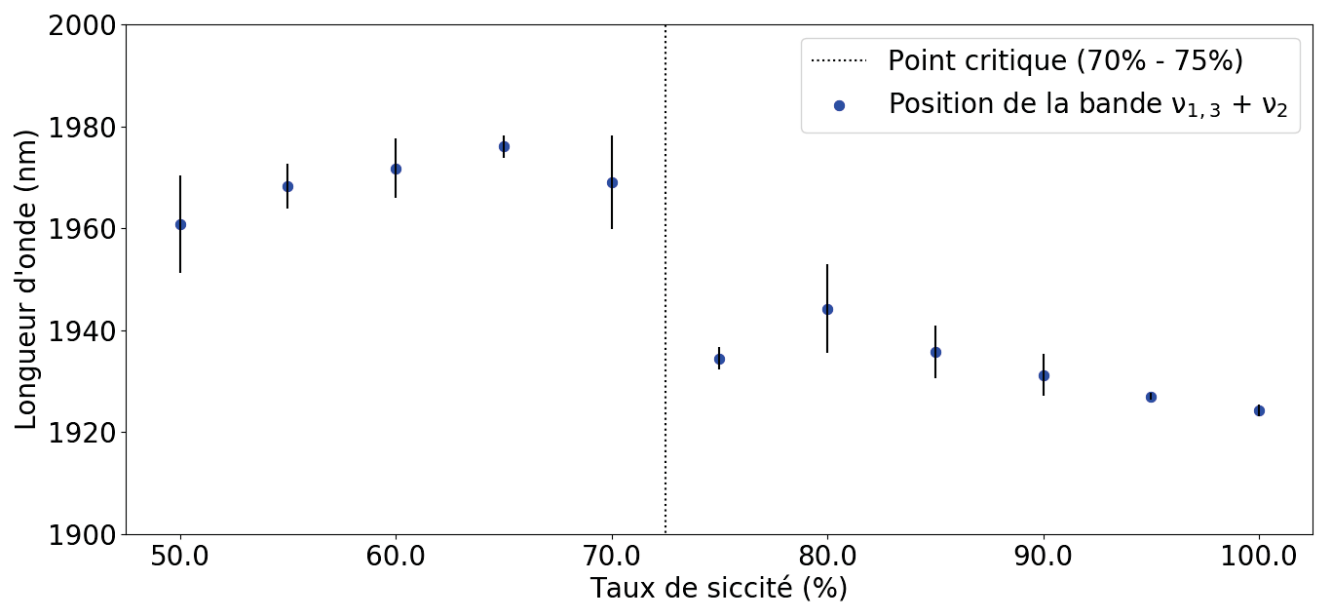


Figure 34. Comparaison des longueurs d'onde observées où l'albédo est au plus faible pour la bande $\nu_{1,3} + \nu_2$ en fonction du taux de siccité

Taux de siccité (%)	Longueur d'onde (nm)	
	Bande $2\nu_{1,3}$	Bande $\nu_{1,3} + \nu_2$
50,0	1494 ± 3	1961 ± 9
55,0	1496 ± 1	1968 ± 4
60,0	1497 ± 2	1972 ± 6
65,0	1496 ± 2	1976 ± 2
70,0	1495 ± 2	1969 ± 9
75,0	1467 ± 6	1935 ± 2
80,0	1480 ± 5	1944 ± 9
85,0	1469 ± 8	1936 ± 5
90,0	1453 ± 6	1931 ± 4
95,0	1461 ± 1	1927 ± 1
100	1448 ± 10	1924 ± 1

Tableau 4. Comparaison des longueurs d'onde observées où l'albédo est minimal pour les deux bandes IR en fonction du taux de siccité

3.3 Comparaison entre la technique gravimétrique et spectroscopique

Les spectres d'albédo sont générés à partir de la lumière réfléchie par la surface d'un échantillon. Le signal détecté par l'ASD ne représente que les toutes premières couches d'une surface où l'extinction n'est pas encore totale. Comme expliquée dans la section sur l'absorbance selon Beer-Lambert, moins de 1 mm d'épaisseur de résidus de bauxite humides suffit pour absorber 99% de la lumière.

Cependant, la surface analysée n'a pas nécessairement le même taux de siccité que le corps (ou le *bulk*) du composé analysé. Notamment, l'évaporation se produit à la surface, donc celle-ci serait moins humide que l'intérieur des échantillons.

Ceci dit, pour les résultats présentés ci-dessus, les échantillons étaient préparés en petites quantités (environ un gramme) et conservés dans des contenants fermés. La différence entre l'humidité interne et externe est négligeable. Par contre, la réalité à prendre en compte est le site de disposition des résidus de bauxite (SDRB) où la quantité de boues rouges est entreposée par tonnes et leur évaporation à l'air libre est continue.

Dans les travaux de routine de l'usine d'Arvida, des échantillons sont pris régulièrement dans les différents secteurs du SDRB pour suivre leur taux de siccité par gravimétrie. Pour vérifier l'application de la méthode développée en laboratoire, la technique spectroscopique a été comparée avec cette technique gravimétrique. Or, au SDRB, la gravimétrie consiste à échantillonner une certaine masse précise, mais arbitraire (environ 30 à 50 grammes sur quelques centimètres d'épaisseur du sol) de résidus de bauxite.

Ceci est beaucoup plus que les échantillons présentés jusqu'ici. La portion de la surface devient minoritaire par rapport à la portion volumétrique prélevée. Ainsi, il est possible que les résultats gravimétriques rapportés possèdent une concentration d'eau différente des résultats rapportés par notre technique spectroscopique.

La partie ci-dessous tente d'établir si cette différence est importante. L'hypothèse est que si les taux de siccité sont calculés à partir des données d'albédo, les valeurs produites seront supérieures à celles produites par l'analyse gravimétrique parce que la surface sèche plus rapidement.

Pour démontrer l'existence d'un gradient de siccité, deux expériences de longue durée (quelques jours) ont été réalisées pour suivre l'évaporation continue d'environ 400 grammes de résidus dans un grand contenant ouvert de 3 litres. La hauteur des résidus de bauxite atteignait 5-10 cm. Ceux-ci, d'abord secs, ont été rapidement mélangés avec une quantité d'eau précise (voir tableau 5). Une fois que l'eau était bien distribuée, l'expérience débutait.

Une balance automatique enregistrait la masse à chaque incrément d'une minute. Le détecteur de l'ASD était accroché au-dessus des résidus de bauxite et les mesures d'albédo prises étaient manuelles (l'expérimentateur devait être présent). Donc les données gravimétriques sont continues, mais les données spectroscopiques sont discontinues dans le temps. Le montage est présenté à la figure 35.

Tableau 5. Paramètres de deux expériences de suivis d'évaporation de résidus de bauxite par gravimétrie et par spectroscopie

	Durée (h)	Masse de résidus (g)	Siccité initiale (%)	Siccité finale (%)
Expérience 1	67,5	411,0	80,6	92,9
Expérience 2	127,5	411,5	56,2	75,7



Figure 35. Montage d'une balance automatique accompagné d'un ASD qui analyse l'évaporation libre de boues rouges

D'abord, la première expérience de suivi d'évaporation était pour des résidus granuleux relativement secs. L'évolution des taux de siccité pendant l'évaporation est présentée à la figure 36. Les résultats de siccité générés par l'ASD sont plus élevés (jusqu'à 9% de différence par rapport à la gravimétrie) et varient rapidement dans les cinq premières heures avant que la vitesse d'évaporation ralentisse et que la variation soit linéaire. Les points sont présentés en groupe de réplicats et il y a une petite variation aléatoire visible entre eux. À l'inverse, les résultats de siccité générés par la balance sont plus faibles et varient linéairement du début à la fin.

Cela suppose qu'effectivement la surface sèche plus rapidement que l'intérieur des résidus. De plus, les

deux séries de points semblent converger, réduisant ainsi le gradient de siccité à mesure que l'évaporation avance. En d'autres mots, la concentration en eau s'homogénéise avec le temps.

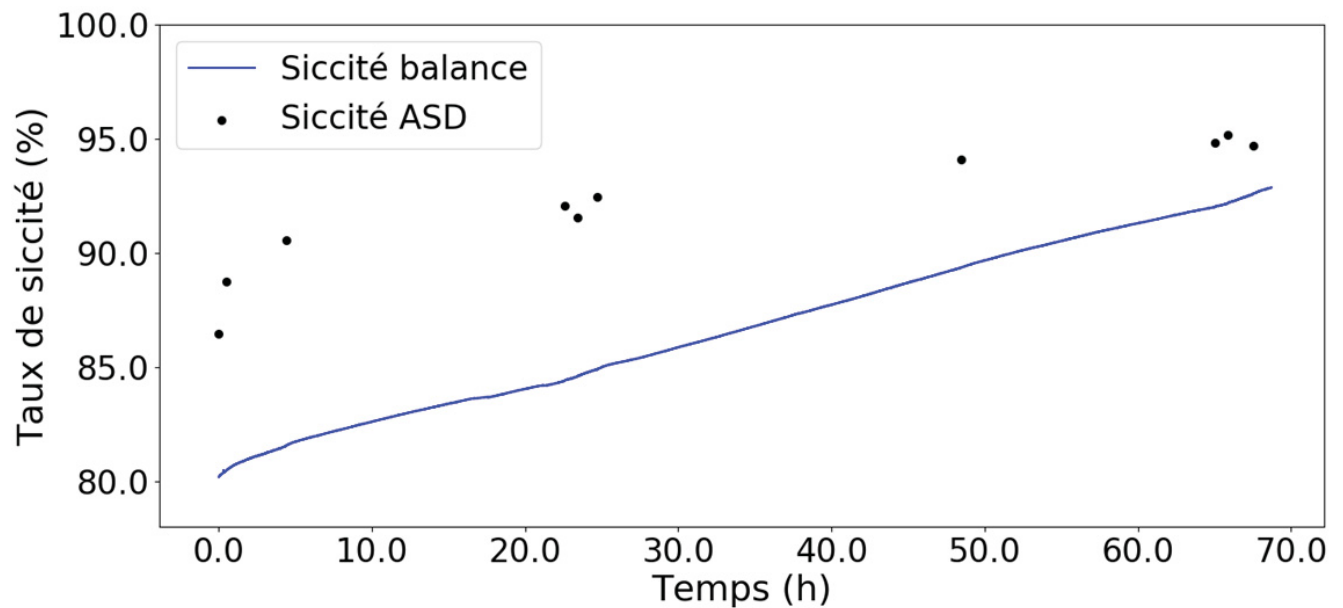


Figure 36. Comparaison gravimétrique et spectroscopique (selon les résultats de la figure 29 de la bande $2\nu_{1,3}$) du taux de siccité de résidus de bauxite granuleux initialement à 80,6%

Pour la deuxième expérience (figure 37), l'échantillon avait une plus grande quantité d'eau, assez pour qu'il y ait initialement une mince couche de surnageant. Celle-ci est d'abord riche en suspension de résidus. Les résultats tirés de la gravimétrie sont linéaires comme pour l'autre expérience.

Par contre, les résultats tirés de la spectroscopie sont particuliers. Au début, les taux de siccité chutent à mesure que la sédimentation progresse avant d'augmenter à mesure que le surnageant disparaît. Ainsi, lorsque le surnageant est présent, l'albédo (analysé pour la bande $2\nu_{1,3}$) est plus grand avec la présence des suspensions. Celles-ci contribuent à la réflexion de l'infrarouge.

Il est à noter que lorsque les taux de siccité calculés sont en dessous de 50%, ce sont des résultats extrapolés des droites d'étalonnage, donc il est préférable d'apprécier ces valeurs d'un point de vue qualitatif plutôt que d'un point de vue quantitatif.

Éventuellement, entre 30 heures et 50 heures de suivi, les points de l'ASD dépassent ceux de la balance (jusqu'à 7% de différence). À partir de ce moment, l'augmentation du taux de siccité est linéaire comme pour l'autre expérience. Encore une fois, les deux types de résultats convergent. La rencontre se produit après environ 100 heures.

Ces expériences de comparaison confirment que les résultats de spectroscopie peuvent être bien différents de ceux de la gravimétrie lorsque l'état du système est en évolution. Il tend vers un équilibre après

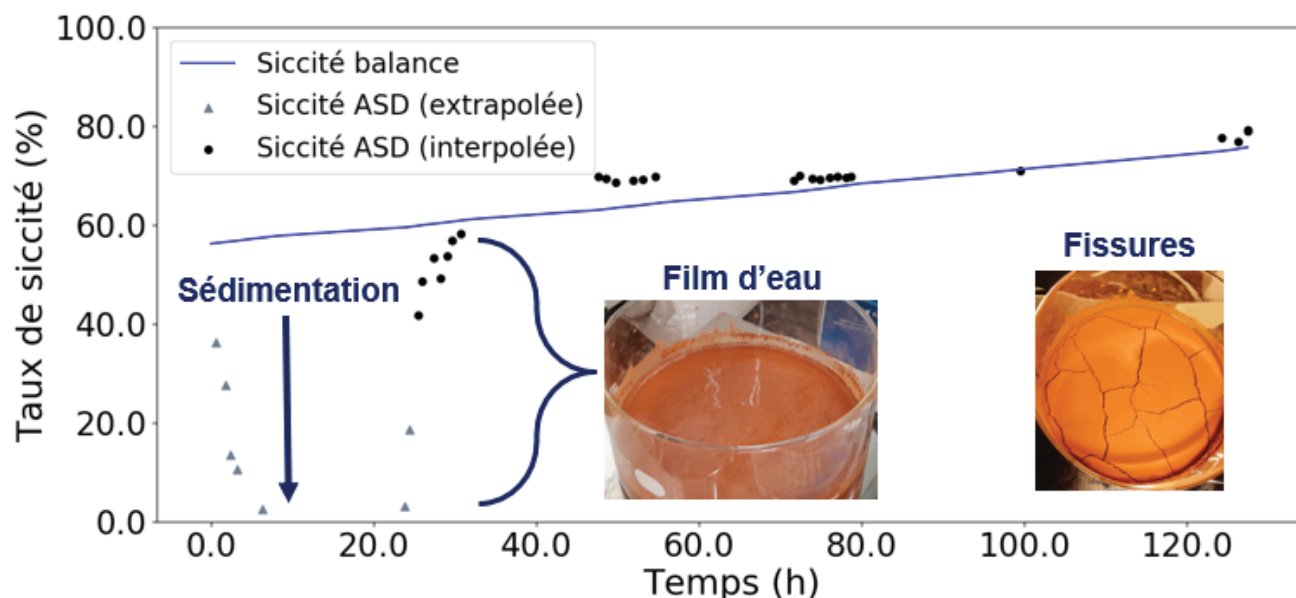


Figure 37. Comparaison gravimétrique et spectroscopique (tiré de l'interpolation ou l'extrapolation de la figure 29 de la bande $2\nu_{1,3}$) du taux de siccité de résidus de bauxite humides initialement à 56,2%

plusieurs heures où il semble que la cinétique d'évaporation de l'eau dépende du transport de l'eau par capillarité au travers des résidus. Pour plus d'informations, des travaux connexes ont traité sur la cinétique d'assèchement des résidus de bauxite (41).

Enfin, l'hypothèse de cette section était que les taux de siccité calculés par l'ASD seraient supérieurs à ceux de la balance. En réalité, il y a des situations où les résultats spectroscopiques sont inférieurs, supérieurs ou identiques à la gravimétrie. Le gradient de siccité par rapport à la profondeur dépend de l'épaisseur des résidus, de la vitesse d'évaporation et de la durée écoulée. Sur le terrain, la profondeur des sols du SDRB peut atteindre quelques mètres et l'évaporation se déroule sur quelques années. De plus, même si l'évaporation est plus rapide pour la surface, des précipitations d'eau vont causer une diminution rapide du taux de siccité de surface.

Les incidents d'emportement sont causés par les poussières exposées aux vents à la surface des sols. L'utilisation de la spectroscopie est très pertinente pour évaluer les risques d'emportement. En effet, la gravimétrie néglige la différence du taux de siccité entre la surface et le volume total de l'échantillon. Donc, un sol qui contient en apparence assez d'eau pour la rétention des poussières pourrait être à risque d'emportement si la surface est beaucoup plus sèche. Ainsi, la spectroscopie serait une méthode complémentaire intéressante qui renseigne davantage sur l'état de la surface.

3.4 Évaluation de la méthode spectroscopique sur le terrain

Afin de valider la technique spectroscopique décrite au début du chapitre, des mesures d'albédo ont été réalisées au SDRB sur différentes surfaces avec des mesures de gravimétrie en parallèle. Les surfaces étudiées sont surtout les rejets rouges de l'industrie. Une première série de comparaison a été effectuée pendant l'automne (échantillons humides) et d'autres pendant l'hiver (échantillons congelés). En tout moment, le ciel était dégagé et l'ASD était étalonné fréquemment avec le spectralon. Une fois les mesures avec l'ASD prises pour une surface spécifique, quelques centimètres du sol étaient prélevés pour l'analyser par gravimétrie.

Tout d'abord, pour les résidus humides de l'automne, les résultats sont calculés à partir de la première droite d'étalonnage présentée (figure 29). Toutes les mesures ont été réalisées en un seul après-midi. Les résultats de la spectroscopie sont, en général, assez similaires aux résultats produits par la gravimétrie (voir tableau 6). Les différents échantillons de poussières de bauxite proviennent de différents secteurs du SDRB. Du sable et des copeaux de bois étaient aussi présents (ils servent d'abat-poussières). Les écarts-types présentés sont propagés à partir de l'erreur sur la mesure et de l'erreur sur la droite d'étalonnage. Malheureusement, aucune erreur n'a pu être associée aux résultats de gravimétrie qui étaient fournis par l'industrie.

Échantillons automnaux étudiés	Siccité selon la gravimétrie (%)	Siccité selon la spectroscopie (%)	
		Bande $2\nu_{1,3}$	Bande $\nu_{1,3} + \nu_2$
Poussières SDRB (1)	73,9	69 ± 4	NA
Poussières SDRB (2)	68,7	$65,8 \pm 3,3$	NA
Poussières SDRB (3)	67,7	$73,5 \pm 0,4$	NA
Poussières SDRB (4) avec couvert de sable	80,8	$86,6 \pm 1,4$	NA
Sable	93,1	$82,7 \pm 0,5$	NA
Copeaux de bois	NA	$85,6 \pm 0,8$	NA

Tableau 6. Comparaison des résultats de taux de siccité selon la technique gravimétrique et spectroscopique pour diverses surfaces du SDRB en automne

Les résultats à partir de la bande d'absorbance $\nu_{1,3} + \nu_2$ sont indisponibles. En effet, il y avait du bruit d'appareil trop élevé dans cette région (voir figure 38). La cause pourrait être météorologique (de légers stratus passagers bloqueraient partiellement la lumière) ou des composés chimiques non lavés des résidus étaient présents au SDRB. En effet, les résidus de bauxite utilisés en laboratoire lors de l'étalonnage sont lavés.

L'incertitude relative des poussières au SDRB (surface 1 à 4 du tableau 6) variait entre 0,58% et 5,8% pour les résultats relevés par la spectroscopie. Cela démontre une bonne précision pour la méthode. Dans le même ordre d'idées, leur exactitude relative par rapport aux résultats gravimétriques se situait entre 91% et 96%, ce qui est très bien, considérant les différents angles que les deux méthodes apportent. C'est-à-dire, la gravimétrie analyse l'ensemble d'un échantillon, alors que la spectroscopie analyse seulement sa surface.

Par ailleurs, la figure 38 montre des informations additionnelles selon le type de couvert étudié. Par exemple, les résidus de bauxite à découvert ont un pic d'albédo à 750 nm (la longueur d'onde du rouge) que le sable et les copeaux de bois n'ont pas. Cela est surtout causé par l'absorption des autres couleurs par l'hématite présente dans les résidus miniers.

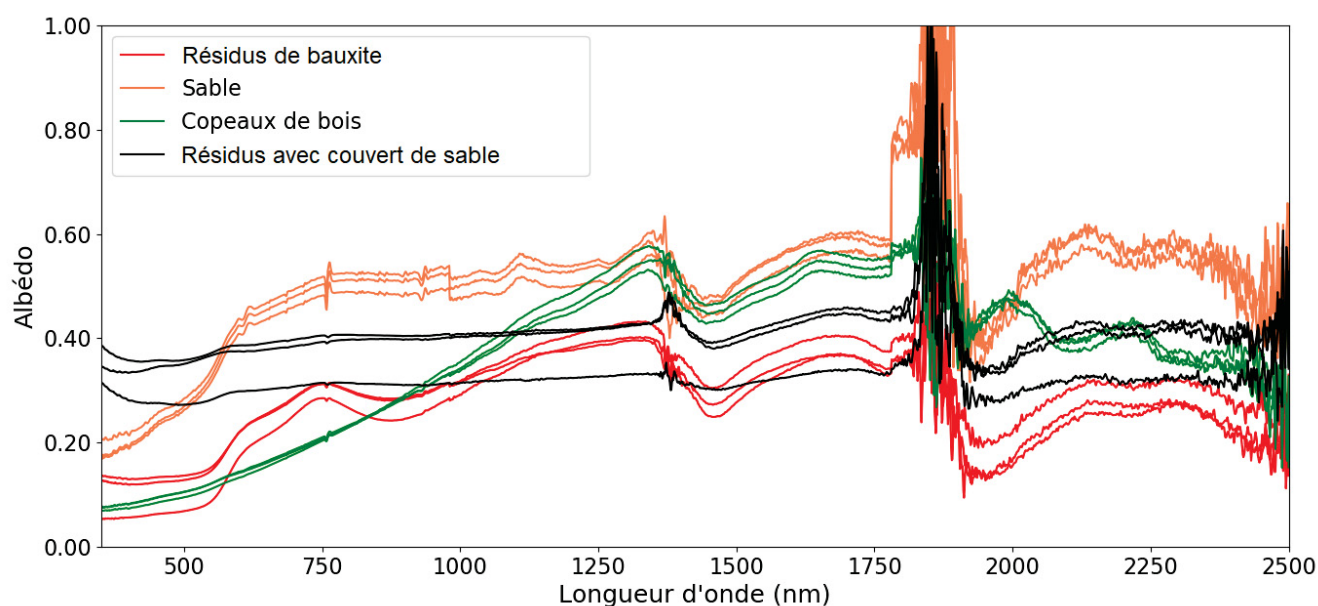


Figure 38. Spectres bruts d'albédo de certaines surfaces étudiées au SDRB pendant l'automne

Ensuite, pour ce qui est de la comparaison réalisée en hiver, la droite d'étalonnage (figure 30) est utilisée telle qu'elle, sans restreindre sa plage de taux de siccité. Comparativement à la gravimétrie, il y a des différences importantes dans les résultats (voir tableau 7). Non seulement cela, il y a aussi des écarts-types importants ainsi que des dissimilitudes entre les deux bandes d'absorbance de l'IR surtout pour les plus bas taux de siccité.

Ces inconsistances sont explicables d'abord par les formes incongrues des résidus congelés étudiés qui nuisent à la reproductibilité des réplicats. Également, les taux de siccité de surface peuvent être différents du corps de l'échantillon, comme expliqué à la dernière section. Il y avait des cristaux de glace déposés à la surface des échantillons les plus humides (morceaux #2 et #3 du tableau 7). Lorsque ces échantillons ont été analysés, les réplicats des mesures prises présentaient des écarts importants.

Ainsi, les incertitudes relatives relevées du tableau 7 pour les morceaux de résidus de bauxite variaient entre 15% et 35% pour la bande $2\nu_{1,3}$ et entre 8,1% et 22% pour la bande $\nu_{1,3} + \nu_2$. Les plus grandes valeurs sont expliquées par les écarts d'albédo entre les répliquats d'un même échantillon. Puis, leur exactitude relative variait entre 68% et 89% pour la première bande et entre 83% et 92% pour la deuxième bande. Selon la surface analysée, la précision et l'exactitude de la méthode sont inférieures pour les surfaces plus humides (moins de 60% de siccité).

Échantillons hivernaux étudiés	Siccité selon la gravimétrie (%)	Siccité selon la spectroscopie (%)	
		Bande $2\nu_{1,3}$	Bande $\nu_{1,3} + \nu_2$
Morceaux de résidus (1)	80,8	72 ± 11	$66,8 \pm 5,4$
Morceaux de résidus (2)	58,6	40 ± 14	54 ± 12
Morceaux de résidus (3)	59,7	47 ± 13	53 ± 10
Copeaux de bois et résidus	68,9	$91,6 \pm 6,4$	$92,4 \pm 6,1$

Tableau 7. Comparaison des résultats de taux de siccité selon la technique gravimétrique et spectroscopique pour diverses surfaces du SDRB en hiver

Les spectres bruts de cette expérience sont également présentés à la figure 39. Encore une fois, des surfaces comme la neige ou la gypsite ont un comportement spectroscopique différent sous la lumière visible qui les distinguent des résidus miniers. Il y a encore un peu de bruit dans la zone au-delà de 1800 nm, mais cela n'a pas empêché de produire les résultats pour cette bande IR cette fois-ci.

Au final, différents avantages et inconvénients peuvent être associés à la technique spectroscopique. Ses avantages principaux sont qu'elle donne certaines informations sur la composition et l'état de la surface à l'étude. En effet, elle peut discerner les boues rouges des autres matériaux et observer un léger décalage dans les spectres causés par un changement d'état de l'eau.

Son avantage principal est que seule la surface des sols est analysée, ce qui permet de poser ses observations seulement sur la portion problématique aux emportements de poussières fugitives.

Son principal inconvénient est que la technique est très sensible aux interférences météorologiques ou chimiques ainsi qu'à un mauvais positionnement du détecteur, malgré une normalisation des spectres. Bien que les résultats pointent généralement dans la bonne direction, les variabilités d'une analyse à l'autre restent importantes.

Les applications pratiques de la méthode développée dans ce chapitre requièrent de la télédétection. En utilisant des drones ou des satellites qui peuvent récolter des données d'albédo aux longueurs d'onde étudiées, il serait possible d'analyser une grande superficie du SDRB. Il reste des incertitudes par rapport

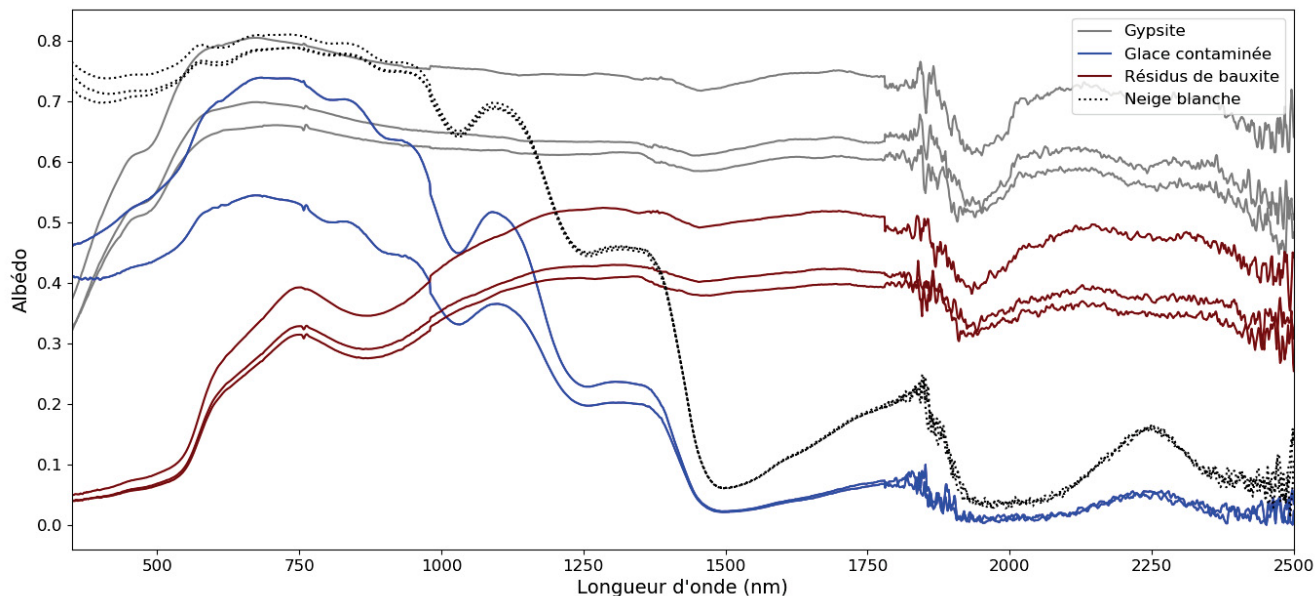


Figure 39. Spectres bruts d'albédo de certaines surfaces étudiées au SDRB pendant l'hiver

à la technique spectroscopique, surtout causées par les interférences discutées ci-dessus. Dans un premier temps, il serait donc nécessaire que les données récoltées à grande échelle soient corroborées avec des observations humaines sur le terrain. Cela permettrait aussi de mieux comprendre les risques d'emportement en fonction des conditions environnementales.

Éventuellement, les mesures par télédétection seraient un outil intéressant pour rapidement déterminer les taux de siccité de différents secteurs du SDRB. Cette information est nécessaire pour les opérations de routine faites au SDRB. De plus, par rapport aux risques d'emportement, la télédétection pourrait permettre d'identifier rapidement le moment que les résidus de bauxite atteignent un taux de siccité trop élevé.

De plus, les mesures de prévention sont l'usage d'abats-poussières comme des copeaux de bois ou de la neige. Comme observé ci-dessus (figures 38 et 39), leurs spectres sont différents de ceux des résidus de bauxite à découvert.

Finalement, il serait très pertinent de suivre le décalage des longueurs d'onde des bandes d'absorption de l'eau pendant l'hiver. Un secteur congelé de résidus de bauxite (en absence de neige) peut continuer de s'évaporer par sublimation. Les résultats suggèrent que si les taux de siccité sont plus grands que 75%, les résidus deviennent granuleux et la cohésion due à la congélation disparaît. Le risque d'emportement des poussières augmente. Ce phénomène peut être suivi en évaluant le décalage spectroscopique des bandes de l'eau en IR vers les plus petites longueurs d'onde.

Chapitre 4

Détermination de la teneur en résidus de bauxite dans les couverts nivaux

L'emportement des poussières peut contaminer la neige et lui donner une coloration rosée évidente. Une concentration aussi petite que 0,459 mg/g (voir figure 25) est suffisante pour constater la contamination. Une méthode spectroscopique a été développée pour vérifier la possibilité de suivre les degrés de contamination en résidus de bauxite dans la neige. L'idée serait d'utiliser ces méthodes pour identifier des emportements de poussières.

Dans ce chapitre, les mesures d'albédo de couverts nivaux sont corrélées en fonction de différentes teneurs en résidus de bauxite. Des droites d'étalonnage sont encore construites. Bien que l'albédo est fortement corrélé aux teneurs, la corrélation n'est pas linéaire. Alors, différents modèles empiriques et le modèle théorique de TARTES sont comparés avec les droites d'étalonnage afin de mieux expliquer la relation non linéaire. Puis, une validation de la méthode est effectuée en comparant des résultats obtenus sur le terrain au SDRB. Enfin, les perspectives de la méthode sont expliquées en fin de chapitre.

4.1 Relation entre l'albédo et la concentration en résidus de bauxite dans la neige

Ci-dessous, plusieurs mesures d'albédo sur de la neige contaminée en résidus de bauxite ont été réalisées. La préparation des échantillons de neige rose a été expliquée dans le chapitre de la méthodologie. Puis, les spectres d'albédo mesurés par l'ASD sont étudiés et des droites d'étalonnage sont construites.

Tout d'abord, la figure 40 montre quelques exemples de spectres bruts d'albédo pour une variété de concentrations de résidus de bauxite dans la neige. La première chose à noter est que les bandes d'absorbance de l'eau en IR précédemment utilisées ne sont pas exploitables puisque la neige sature le signal. Bien que l'albédo semble légèrement augmenter à mesure que la concentration augmente, la sensibilité est trop faible pour construire des droites d'étalonnage à partir de cela.

En revanche, le domaine du visible est très intéressant. Pour de faibles niveaux de contamination, la neige va réfléchir la majorité des rayons visibles et produire un albédo élevé dans la région du visible. Puis, à mesure que le niveau de contamination augmente, les résidus miniers absorbent la lumière entre 300 et 900 nm, mais pour des intensités variables. En effet, un pic d'albédo se forme à 750 nm (la longueur

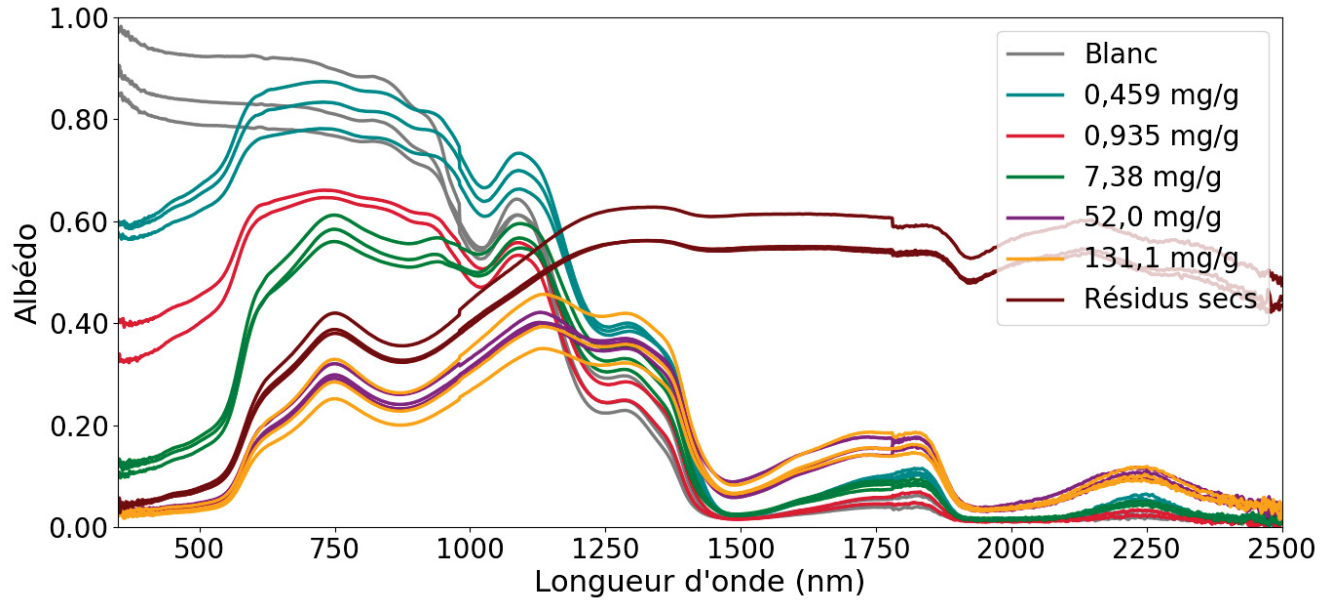


Figure 40. Spectres bruts d'albédo d'échantillons de neige rose préparés avec différentes concentrations en résidus de bauxite

d'onde correspondant au rouge), tandis qu'un creux se forme autour de 490 nm et moins (la longueur d'onde correspondant au bleu). La sensibilité du signal à 490 nm entre 0 et 50 mg/g est satisfaisante pour construire une droite d'étalonnage.

Une normalisation est encore réalisée pour cette application de la spectroscopie. Encore une fois, l'albédo pourrait varier de manière incontrôlable et faire varier l'ensemble du signal, comme expliqué dans le chapitre d'avant. La normalisation a été réalisée par rapport à la longueur d'onde qui était généralement maximale dans le domaine du visible soit 750 nm. D'autres longueurs d'onde auraient été de bonnes candidates, comme celle à 1250 nm. Pour les résultats ci-dessous, l'albédo normalisé ou relatif suit la relation suivante :

$$Albédo\ relatif_{\lambda} = Albédo_{\lambda} / Albédo_{750nm} \quad [4.1]$$

Avec λ représentant un point pour une certaine longueur d'onde λ .

Par simple curiosité, la figure 41 montre ces spectres normalisés, mais aucune nouvelle information n'en est tirée. L'albédo relatif dans la zone IR est très élevé puisque le signal y est toujours relativement élevé par rapport à la longueur de référence à 750 nm.

Enfin, la figure 42 regroupe toutes les mesures prises de la figure 41 et plusieurs autres mesures faites sur différentes journées. Les barres d'erreur représentent l'écart-type entre les réplicats de mesures pour

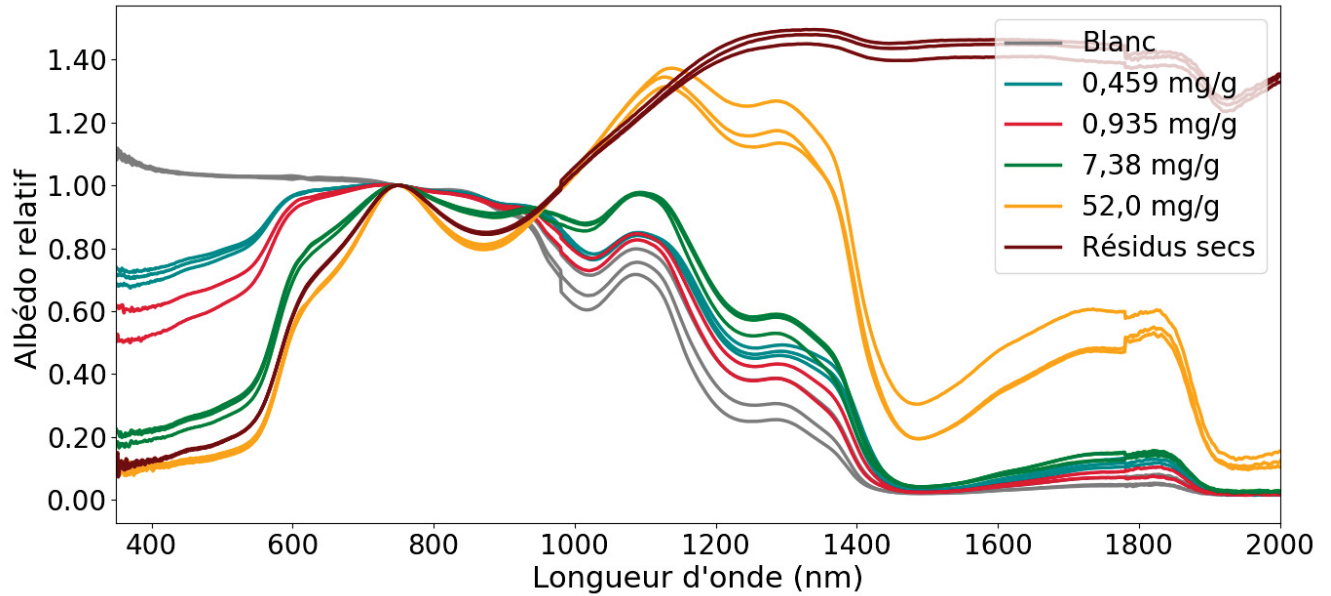


Figure 41. Spectres d'albédo normalisés à 750 nm d'échantillons de neige rose préparés avec différentes concentrations en résidus de bauxite

un point donné. L'albédo à la longueur d'onde de 490 nm est choisi parce que c'est le pic d'absorbance des résidus de bauxite. Lorsque mis en relation avec la référence à 750 nm, l'albédo relatif de la droite d'étalonnage devrait représenter l'extinction de la lumière causée par l'absorption des résidus.

Les mesures du blanc (neige blanche non contaminée) est incluse, mais pas celles des résidus secs parce que sa teneur n'est pas définie (la matrice, soit la neige, est absente). Ceci dit, son albédo relatif était identique aux plus grandes concentrations d'échantillons préparés. Cela signifie qu'il est facile d'atteindre une concentration critique de résidus dans la neige où l'albédo relatif à 490 nm ne varie plus.

La relation n'est pas linéaire. L'albédo chute rapidement entre 0 et 10 mg/g, diminue lentement entre 10 et 50 mg/g, puis se stabilise vers 0,15 au-delà de 50 mg/g (le minimum de l'albédo relatif observé est 0,13). Rappelons que les résidus de bauxite secs avaient aussi un albédo relatif de 0,15, donc, plus la teneur en poussières dans la neige croît, plus l'albédo relatif tend vers une asymptote horizontale.

Deux modèles empiriques ont été élaborés pour tenter de comprendre quelle relation mathématique représente le mieux les données expérimentales. Le meilleur modèle sera utilisé pour évaluer la teneur en poussières des couverts nivaux à partir de leur spectre d'albédo. Considérant l'asymptote horizontale, une relation inverse (équation 4.2) et une relation exponentielle décroissante (équation 4.3) ont été mises à l'épreuve. Le modèle inverse est :

$$Albédo = \frac{a}{Teneur - h} + k \quad [4.2]$$

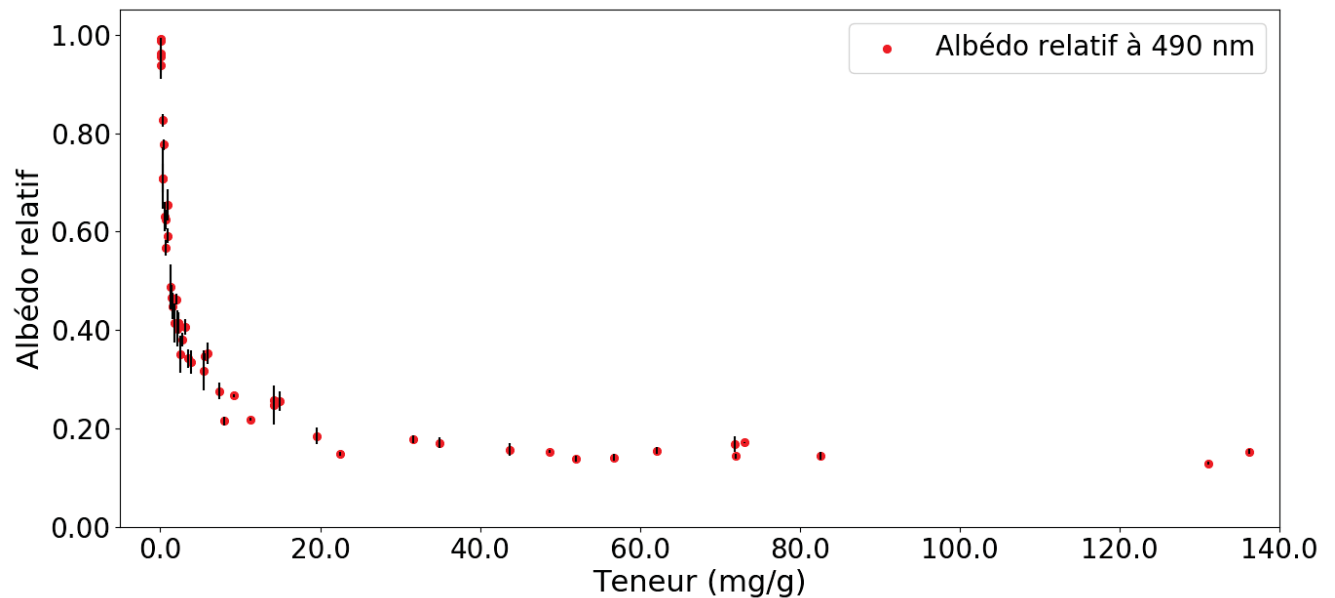


Figure 42. Dépendance de l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) des échantillons préparés de neige rose en fonction de la teneur en résidus de ceux-ci

Le modèle exponentiel décroissant s'inspire de la loi de Beer-Lambert (équation 1.5), donnant :

$$Albédo = a 10^{-b \times Teneur} + k \quad [4.3]$$

Les paramètres a , b , h et k sont données dans le tableau 8. La manière dont ces paramètres ont été déterminés est expliquée exhaustivement dans l'annexe. En résumé, ils ont été optimisés pour reproduire une courbe empirique qui représente le plus fidèlement possible les points expérimentaux.

De plus, considérant la relation 1.6, le paramètre b serait le produit de ϵ et L . On pose l'hypothèse que la longueur L , soit la profondeur que la lumière traverse dans le couvert nival avant d'être réfléchi, est constante, qu'importe la teneur.

Tableau 8. Valeurs numériques aux paramètres des modèles empiriques (équations 4.2 et 4.3)

Modèle	a	b	h	k
Modèle inverse	$0,780 \pm 0,016$	NA	-0,92	$0,1590 \pm 0,0073$
Modèle exponentiel décroissant	$0,732 \pm 0,025$	0,265	NA	$0,203 \pm 0,011$

Ces modèles empiriques ont été comparés directement aux points expérimentaux dans la figure 43a. Comme la dépendance de l'albédo pour les teneurs inférieures à 10mg/g est particulièrement importante pour la détection des emportements de poussières, cette région est présentée en détail à la figure 43b. À

première vue, le modèle inverse semble plus fidèle aux points expérimentaux que le modèle exponentiel décroissant.

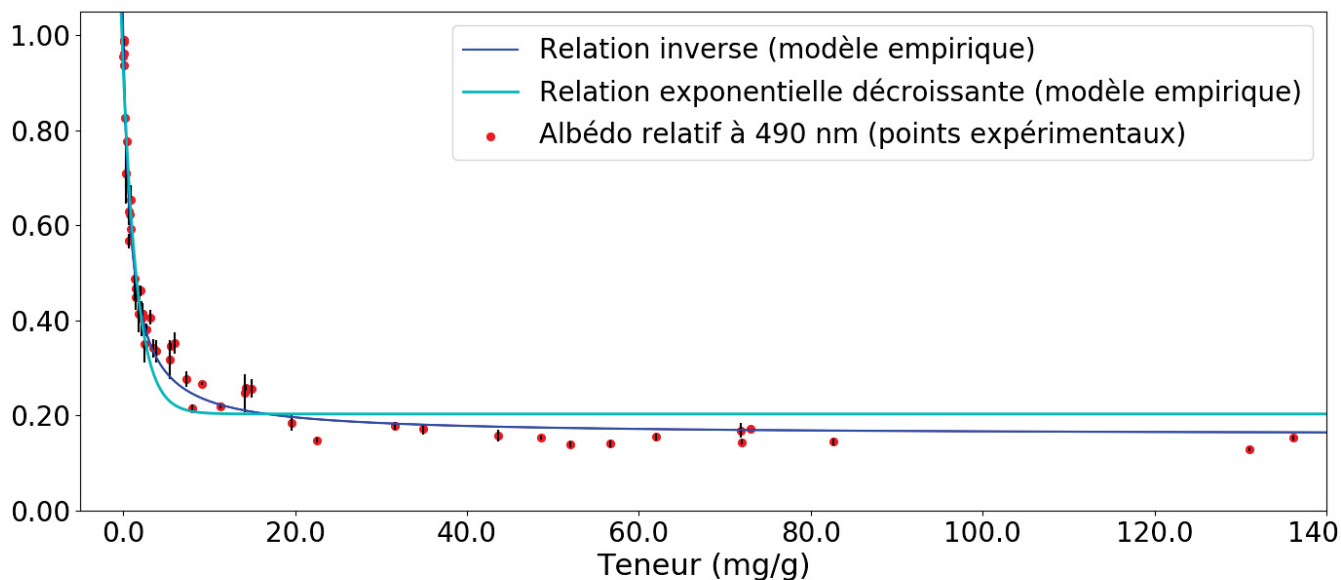


Figure 43a. Comparaison des deux modèles empiriques (équations 4.2 et 4.3) à la relation expérimentale de l'albédo relatif selon la teneur en résidus des échantillons

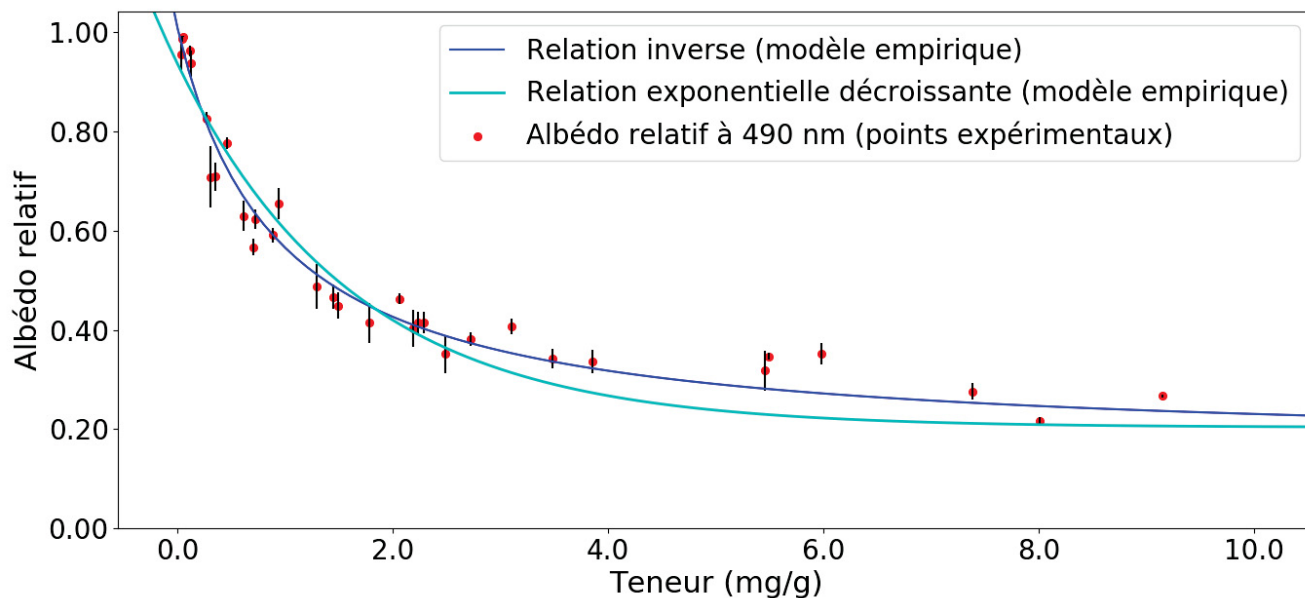


Figure 43b. Détails de la comparaison de la figure 43a entre 0 et 10 mg/g de teneur

Pour prouver mathématiquement quel modèle est le plus fidèle aux points expérimentaux, ceux-ci sont linéarisés. C'est-à-dire, dans le premier cas, l'albédo (mesuré à 490 nm, normalisé à 750 nm) est exprimé

en fonction de l'inverse de la teneur expérimentale et, dans le second cas, en fonction de la puissance négative de la teneur.

D'abord, l'équation qui explique précisément la linéarisation en se basant sur le modèle inverse est :

$$Albedo_{490/750} = aT_i + k \quad [4.4]$$

Avec $T_i = \frac{1}{Teneur - h}$

Avec cette relation, dans la figure 44, l'axe des ordonnées reste l'albédo, mais l'axe des abscisses devient le paramètre T_i tel que défini ci-dessus. Il est à noter que sur l'axe horizontal, les points de la linéarisation vont en ordre décroissant par rapport à leur teneur d'origine.

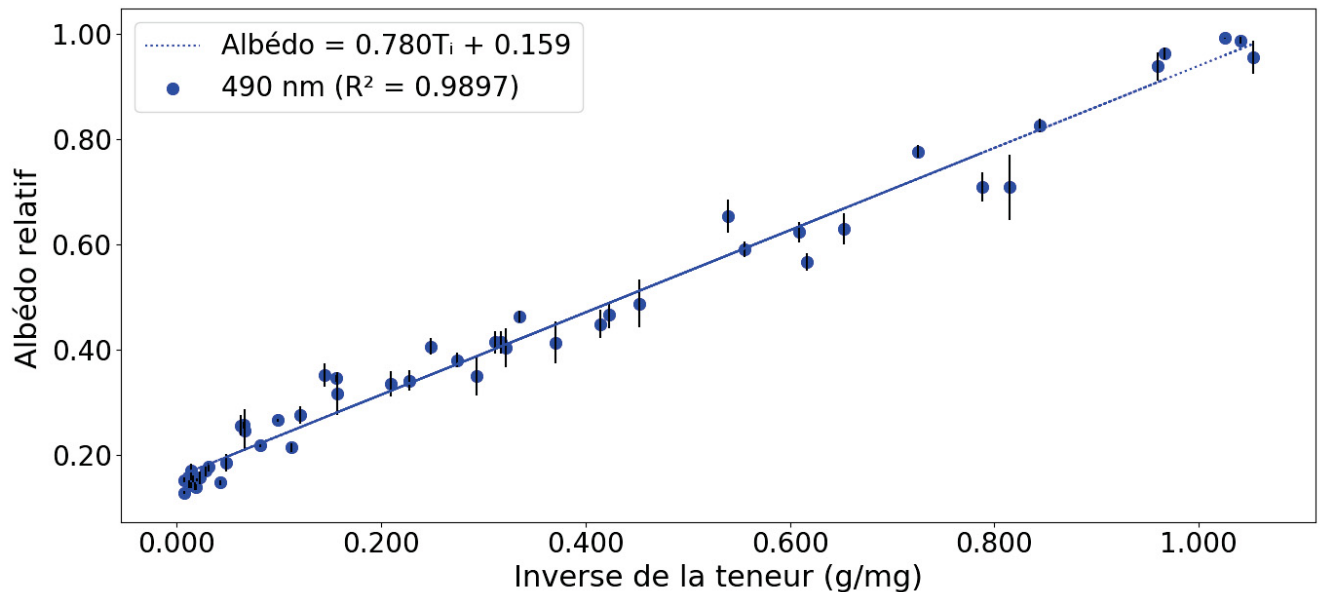


Figure 44. Dépendance de l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) des échantillons de neige rose en fonction de T_i (équation 4.4)

Ainsi, une droite d'étalonnage linéaire est obtenue. Celle-ci possède un R^2 élevé (0,9897) qui justifierait l'utilisation de la relation inverse comme modèle. Sa pente de $(0,780 \pm 0,016)$ mg/g correspond au paramètre **a** (c'est comme cela qu'il a été établi au tableau 8). Son ordonnée à l'origine est de $0,1590 \pm 0,0073$, ce qui correspond au paramètre **k**. Ce dernier représente aussi l'asymptote horizontale qui avait été établie à 0,15 d'albédo relatif pour les hautes concentrations en résidus dans la neige ce qui est très similaire.

En comparaison, l'équation qui explique la linéarisation en se basant sur le modèle exponentiel décroissant est :

$$\text{Albedo}_{490/750} = aT_e + k \quad [4.5]$$

Avec $T_e = 10^{-b(\text{Teneur} - h)}$

Dans le même ordre d'idées, la figure 45 exprime l'albédo en fonction de la variable T_e . Encore une fois, l'axe des abscisses va en ordre décroissant des teneurs d'origine.

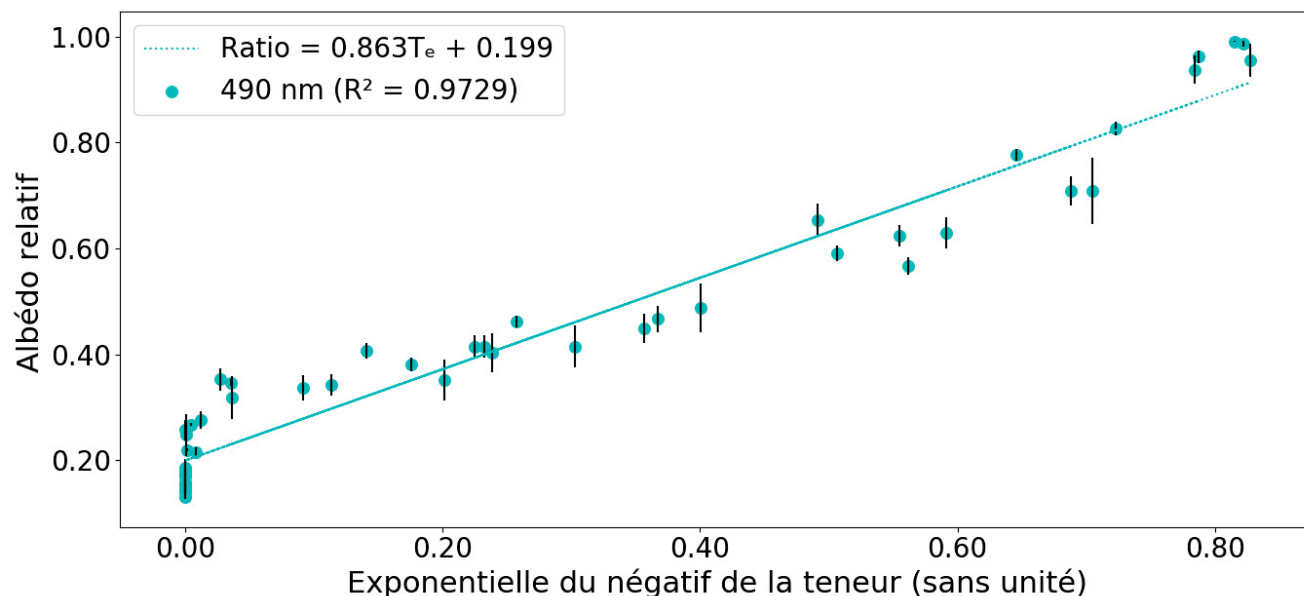


Figure 45. Dépendance de l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) des échantillons de neige rose en fonction de T_e (équation 4.5)

La relation devient encore une fois linéaire, mais son R^2 (0,9729) est plus faible que pour l'autre linéarisation. Visuellement, les points aux deux extrêmes de la figure sont en effet déviants par rapport à la courbe de tendance. Sa pente, $0,732 \pm 0,025$, correspond au paramètre **a** et son ordonnée à l'origine, $0,203 \pm 0,011$, au paramètre **k**. Ce dernier est plutôt élevé par rapport à l'asymptote horizontale établie à 0,15.

L'analyse des résidus des deux dernières régressions linéaires a aussi été réalisée (voir l'annexe aux figures 53 et 54). Dans les deux cas, les tous premiers résidus, du côté gauche, augmentent rapidement. Il ne faut pas oublier que comme nous sommes dans un modèle inverse ou exponentiellement décroissant, ces premiers résidus représentent les concentrations plus élevées (5 mg/g et plus). Puis, les résidus sont mieux distribués par après pour le modèle inverse. Pour le modèle exponentiel, les résidus y forment plutôt une cloche inversée. Cela renforce encore l'affirmation que le modèle inverse est meilleur pour déterminer la concentration des résidus dans la neige.

Les raisons qui expliquent pourquoi le modèle exponentiel décroissant (qui se base pourtant sur Beer-

Lambert) est inférieur au modèle inverse sont diverses. D'abord, bien qu'il est suspecté que l'absorbance joue un rôle majeur dans l'extinction de l'albédo, la diffusion est aussi un facteur important de l'extinction.

Aussi, il a été mentionné que le paramètre **b** du modèle exponentiel décroissant représentait $L \times \epsilon$ (ce dernier étant défini dans l'équation 1.6) et que ce produit serait constant qu'importe la teneur. Or, la plage de teneurs considérée est assez large ; les plus petites valeurs donnent des échantillons de neige légèrement contaminée alors que les plus grandes valeurs ressemblent aux échantillons de résidus de bauxite humides. Donc, il est fort probable que ϵ évolue à mesure que les caractéristiques du composé changent, tout comme la longueur **L** doit diminuer à mesure que la teneur augmente. Un modèle empirique exponentiel plus complet, mais aussi plus complexe, aurait un paramètre **b** dynamique par rapport aux changements de teneur dans la neige.

Pour résumer, il est tout à fait possible de relier l'albédo de la neige à 490 nm (normalisé à 750 nm) à sa concentration en résidus de bauxite. Pour expliquer la relation non linéaire, deux modèles empiriques ont été utilisés. Avec leurs paramètres, il serait possible de calculer des valeurs de teneur en résidus de bauxite dans la neige pour des inconnus. Cela dit, la relation inverse représente plus fidèlement les points expérimentaux que la relation exponentielle décroissante ne serait-ce que par son R^2 plus élevé.

Ce modèle inverse n'est pas vraiment basé sur un principe théorique (contrairement à l'autre), donc son succès n'est peut-être qu'une coïncidence. Néanmoins, il sera utilisé pour la détermination d'inconnus, plus loin dans ce chapitre.

4.2 Corroboracion de la relation entre l'albédo de la neige et sa concentration en résidus de bauxite par le modèle TARTES

La relation entre l'albédo relatif et les teneurs expérimentales est directement comparée au modèle TARTES. C'est-à-dire, plusieurs spectres d'albédo sont générés par les simulations du modèle TARTES. Ces spectres d'albédo sont traités comme les données expérimentales. C'est-à-dire, leur albédo relatif entre 490 nm et 750 nm peut être calculé. Les spectres générés par TARTES sont tracés en variant le paramètre de la teneur en contaminants d'hématite. Cette dernière est choisie pour représenter les résidus de bauxite.

La surface spécifique est fixée à 20 m²/kg dans une première série de simulations, puis à 100 m²/kg dans une seconde. Le premier cas représente la surface spécifique des couverts nivaux expérimentaux (figure 26), mais l'albédo simulé passe trop rapidement en dessous de 0. Le deuxième cas représente de la neige fraîche (16) et sa surface spécifique élevée lui donne un plus grand albédo.

La comparaison entre les points expérimentaux et les simulations est réalisée à la figure 46. De celle-ci, pour les teneurs très faibles (moins de 5mg/g), les trois courbes ont un comportement similaire. Cependant, alors que la relation expérimentale atteint une asymptote à 0,15 d'albédo relatif, les points des simulations continuent de descendre et passent sous l'axe des abscisses.

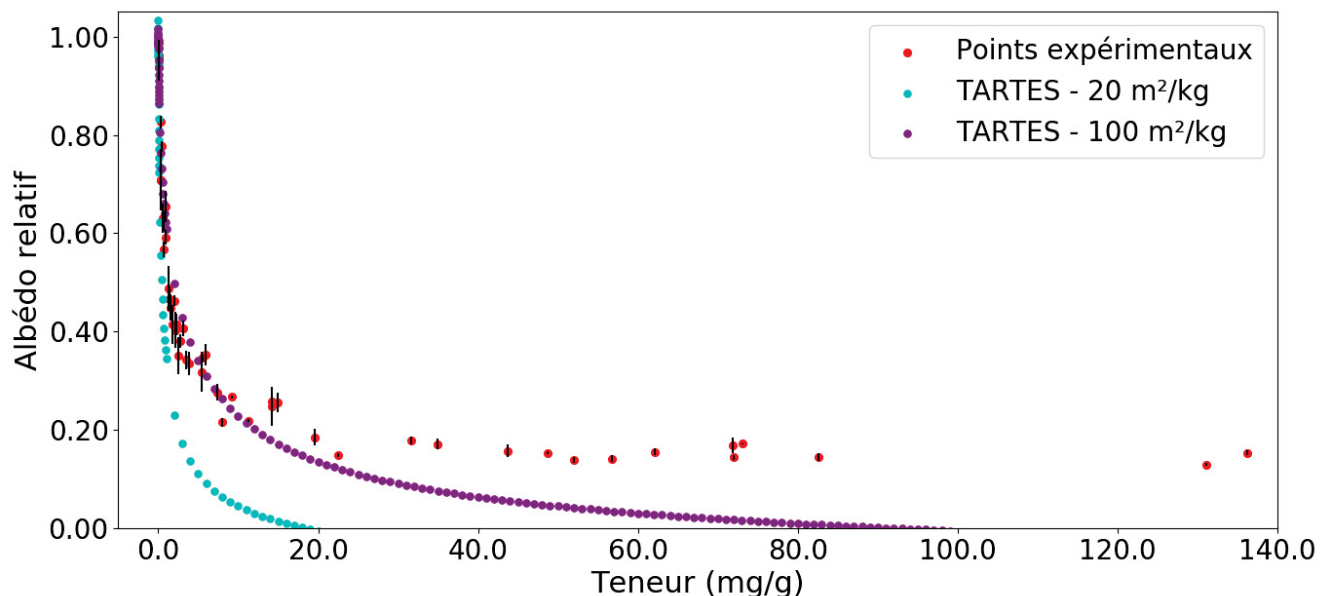


Figure 46. Comparaison entre l'albédo relatif (490nm / 750 nm) des mesures expérimentales et des simulations par le modèle TARTES (hématite) en fonction de la teneur en contaminants

Ci-dessous, quelques points sont soulevés pour expliquer la divergence observée. D'abord, le modèle

TARTES idéalise des surfaces nivales comme quoi les contaminants introduits sont distribués de manière homogène dans la neige. En réalité, les échantillons expérimentaux sont préparés en mélangeant les résidus de bauxite à une certaine quantité de neige. Ce faisant, les résidus ont de la difficulté à pénétrer l'intérieur des cristaux de la neige. Les résidus sont adsorbés sur la surface des cristaux de glace constituant la neige.

Aussi, plus la concentration augmente, plus les caractéristiques des résidus deviennent dominantes tandis que celles de la neige disparaissent. En d'autres mots, les rôles de la matrice et du soluté sont inversés. Pour le modèle TARTES, il semble que la neige est toujours la matrice et que les contaminants sont toujours les solutés, et ce, même pour de hautes concentrations.

Également, pour des concentrations extrêmes (100 mg/g et plus), les conditions expérimentales peuvent causer une fonte prématurée de la neige.

Finalement, seule une portion mineure des résidus de bauxite est composée d'hématite (environ 10 %, tableau 1). Incorporer une multitude de contaminants dans le modèle pour mieux représenter les résidus serait difficile. Cela dit, en testant les autres types de contaminants disponibles au modèle TARTES, mais non reliés au projet, on obtenait aussi un albédo simulé négatif pour des concentrations extrêmes. Ainsi, qu'importe le type de contaminant utilisé, il semblerait que le modèle TARTES est incapable de considérer que l'albédo puisse converger vers une asymptote.

En conclusion, il faut se rappeler que même à partir de 10-20 mg/g de teneur en résidus de bauxite, la neige obtenue a déjà une coloration rose évidente (voir figure 25). En deçà de 10 mg/g, où la coloration est plus subtile et que des méthodes de télédétection seraient plus pertinentes, le modèle TARTES corrobore presque parfaitement les données expérimentales.

4.3 Validation de la méthode spectroscopique du dosage de résidus de bauxite dans la neige

Cette section met en pratique la méthode développée pour doser la concentration en résidus de diverses surfaces au SDRB. Avant cela, un rappel des calculs qui permettent d'estimer les teneurs dans la neige contaminée est expliqué. Puis, la limite de détection (LOD) et la limite de quantification (LOQ) sont évaluées. Enfin, les résultats issus de la technique spectroscopique sont comparés à une technique de filtration de la neige.

Pour commencer, tous les résultats rapportés se basent sur la linéarisation (voir figure 44) du modèle inverse établi en début de chapitre (voir équation 4.4). Plus précisément, à partir des mesures de l'albédo relatif effectuées (490 nm, normalisé à 750 nm) sur les échantillons, le calcul des concentrations en résidus de bauxite est :

$$Concentration = \frac{a}{Albedo_{490/750} - k} + h \quad [4.6]$$

Avec **a** étant la pente de la linéarisation, **k** son ordonnée à l'origine et **h** un paramètre optimisé pour la linéarisation. Leurs valeurs avaient été préalablement établies (tableau 8), ce qui produit :

$$Concentration = \frac{0,780mg/g}{Albedo_{490/750} - 0,159} - 0,92mg/g \quad [4.7]$$

Les concentrations de résidus de bauxite sont encore une fois exprimées en nombre de milligrammes de résidus pour un (1) gramme de neige.

Par cette relation, des limites de détection et de quantification (LOD et LOQ) ont été déterminées. La LOD est la plus petite concentration d'un analyte (les résidus de bauxite) qui peut être observée par la méthode choisie (48). La LOQ est la plus petite concentration qui peut être quantifiée avec un bon degré de confiance (49).

Dans le contexte du projet, les définitions de la LOD et de la LOQ dépendent des petites quantités de résidus de bauxite ajoutés à la neige. L'albédo est normalement de 1,00 pour les blancs (la neige propre). Donc, on cherche à déterminer quelle est la plus petite concentration qui peut faire descendre l'albédo.

Pour déterminer les LOD et LOQ, de minuscules concentrations étalons dans la neige ont été fabriquées. Les masses étant connues, leurs concentrations réelles en résidus ont été calculées avec celles-ci. Ces

étalons sont passés sous l'ASD et, à partir de leur spectre d'albédo, des teneurs ont pu être calculées avec l'équation 4.7.

Le tableau 9 compare directement les teneurs réelles aux teneurs calculées pour un blanc (neige propre) et quatre essais. Les essais vont en ordre croissant de concentration. Les premiers essais et même le blanc produisent des valeurs négatives selon les calculs de l'équation 4.7. Donc, l'atténuation de l'albédo à 490 nm n'était pas assez élevée pour produire un résultat positif. Plus exactement, Albédo_{490/750} doit être compris entre 0,159 (qui correspond à k) et 1,0068 dans l'équation 4.6 pour produire une concentration positive.

Essai	Teneur réelle (mg/g)	Teneur calculée par spectroscopie (mg/g)	Albédo relatif de l'essai
Neige blanche	Blanc	-0,0576 ± 0,0021	1,06
1	0,000441 ± 0,000011	-0,01597 ± 0,00055	1,02
2	0,001489 ± 0,000013	-0,01660 ± 0,00062	1,02
3	0,002445 ± 0,000014	-0,0339 ± 0,0016	1,04
4	0,005343 ± 0,000025	0,1136 ± 0,0069	0,91
LOD : 0,005 mg/g		LOQ : 0,1 mg/g	

Tableau 9. Limite de détection (LOD) et limite de quantification (LOQ) du dosage de résidus de bauxite dans la neige par spectroscopie

Puis, avec une valeur réelle de 0,005343 mg/g, l'essai 4 a produit une teneur positive de 0,1136 mg/g avec le calcul. Le résultat du calcul coïncide avec la plus faible valeur étalon de la figure 25. La LOD fut donc fixée à 0,005 mg/g (arrondis de la valeur réelle de l'essai 4) parce que c'est la première valeur réelle qui a produit une réponse positive de la concentration. La LOQ fut fixée à 0,1 mg/g (arrondis de la valeur calculée de manière spectroscopique de l'essai 4) parce que c'est la plus petite réponse qui a été obtenue des calculs (même que, par la suite, un couvert de neige soi-disant propre a produit une valeur similaire dans le tableau 10).

Par ailleurs, l'albédo relatif (490 nm / 750 nm) associé à chaque essai est aussi donné. Si ce ratio est supérieur à 1,0068, alors la bande à 490 nm n'était pas assez atténuée par rapport à celle de 750 nm pour donner une concentration positive. Et ce n'est qu'à partir de l'essai 4 que l'atténuation était suffisante pour obtenir un résultat positif.

Il peut sembler surprenant que de l'essai 3 à 4, avec une mince augmentation de la teneur réelle (environ 0,0025 mg/g), la teneur calculée ait alors bondit d'environ 0,14 mg/g. L'explication est que, pour les faibles concentrations, la moindre variation de l'albédo affecte grandement les résultats. Plus les concentrations augmentent, moins l'albédo va varier puisqu'il atteint son asymptote. C'est une conséquence du régime

inverse.

Enfin, il est à noter que le nombre de tests effectués est faible. Pour s'assurer que les LOD et LOQ sont fiables, plus de réplicats d'échantillons de très faibles concentrations devraient être analysés. Bref, si la méthode développée dans ce chapitre est mise en application, des révisions de la LOD et de la LOQ seraient nécessaires.

Par la suite, l'ASD fut utilisé au SDRB. Encore une fois, avec la technique spectroscopique, des résultats de concentration sont obtenus. Afin d'avoir une comparaison, une méthode par filtration est réalisée en parallèle pour estimer les teneurs en résidus dans la neige.

Cette technique consiste à échantillonner la surface étudiée (jusqu'à quelques litres de neige ou de glace), puis à la filtrer sur un papier filtre. Le ratio de la masse récoltée sur le filtrat par rapport au volume d'eau fondu est rapporté en mg/mL (nombre de milligrammes de solide pour un millilitre d'eau). Considérant que la densité de l'eau est d'environ 1 mg/mL, il est possible d'approximer que 1 mg/mL = 1 mg/g. L'équipe de l'usine s'est occupée de cette partie et a fourni les résultats de la filtration.

Dans le tableau 10, les résultats tirés de l'albédo sont directement comparés à ceux de la filtration. En ordre croissant de solides filtrés, il y a les surfaces de neige, des surfaces de glace et des blocs de neige qui ont récolté des copeaux de bois provenant des abat-poussières.

Échantillons et couverts nivaux étudiés	Teneur selon la filtration (mg/mL)	Teneur selon la spectroscopie (mg/g)
Couvert nival blanc	0,000095	0,1119 ± 0,0045
Couvert nival rosé (A)	0,0011	0,253 ± 0,013
Couvert nival rosé (B)	0,00190	0,394 ± 0,016
Couvert nival rosé (C)	0,00312	0,263 ± 0,012
Surface glacée rosée	0,1018	0,328 ± 0,032
Bloc de neige avec poussières (A)	0,33	0,344 ± 0,022
Bloc de neige avec poussières et copeaux de bois (B)	1,04	0,236 ± 0,016
Bloc de neige avec poussières et copeaux de bois (C)	16,41	0,401 ± 0,014

Tableau 10. Comparaison de la méthode spectroscopique du dosage de résidus de bauxite dans la neige à des résultats de filtration

Les incertitudes relatives de la méthode spectroscopiques variaient entre 3,6% et 9,7% ce qui satisfaisait. Par contre, l'exactitude est très mauvaise par rapport à la technique de filtration ; il suffit de constater que la plupart des paires de résultats sont sur différents ordres de grandeur.

Tous les couverts nivaux possédaient, selon la filtration, une concentration inférieure à la LOD. Les

résultats calculés par l'albédo étaient nettement supérieurs, quoique similaires ou un peu supérieurs à la LOQ.

Si seulement le dosage par spectroscopie est considéré, les résultats sont sensés parce que les surfaces qui contiennent de la poussière ont des concentrations toujours supérieures au couvert blanc qui n'en contient pas. Pour expliquer les différences avec la filtration, il est possible que la surface ait une plus grande quantité de résidus qu'en profondeur.

Comme il a été expliqué dans le dernier chapitre, la méthode spectroscopique ne peut qu'analyser les premières couches de surface de la neige, alors que la technique de filtration récolte l'échantillon en profondeur. Les échantillons en laboratoire qui servent à la droite d'étalonnage ont été homogénéisés, tandis que les poussières emportées aux vents se déposent sur les surfaces exposées et ne peuvent pas pénétrer l'intérieur du couvert nival.

Par la suite, une surface glacée rosée fut analysée. Les résultats de filtration étaient seulement trois fois moindres que la technique d'intérêt. Il y a peu d'informations à en tirer, mis à part que la technique développée semble s'appliquer autant sur la glace que sur la neige.

Pour terminer, les blocs de neige avaient une concentration élevée de solides filtrés parce qu'ils ne contenaient pas exclusivement des résidus de bauxite. Malgré cela, les résultats de spectroscopie avaient des valeurs modestes, très semblables aux résultats d'avant. C'est intéressant de savoir que la technique développée semble spécifiquement identifier les résidus de bauxite et non des copeaux de bois.

En conclusion, grâce à la méthode développée, il serait possible d'identifier un emportement de poussières. Le dosage exact des teneurs est difficile, à cause de la variation rapide d'albédo dans un régime à faible concentration. Mais, l'estimation exacte n'est pas si importante considérant les buts du projet.

En effet, le but initial était de savoir si les poussières pouvaient être détectées de manière spectroscopique. Il est atteint en considérant la LOD et la LOQ qui sont respectivement de 0,005 mg/g et 0,1 mg/g. En fait, la technique est tellement efficace qu'il faudrait plus se méfier des faux positifs comme un couvert de neige blanc qui obtiendrait une valeur de concentration plus grande que la LOQ.

Les applications de la méthode demanderaient des méthodes de télédétection (avec des drones ou des satellites). Les emportements peuvent faire voyager les poussières sur une distance variable. Parfois, le personnel de l'usine observe des emportements locaux au SDRB. C'est-à-dire, ils ne causent pas de problème puisque les poussières ne sortent pas des limites du site. Donc, avec des mesures de télédétection régulières (par exemple, plusieurs fois quotidiennement), il serait possible de suivre l'augmentation de la concentration en résidus dans des zones auparavant blanches. Cela permettrait d'agir en conséquence pour contenir ces emportements avant qu'ils deviennent problématiques.

De plus, les conditions propices à ces événements dépendent des conditions météorologiques. Celles-ci pourraient comparer à l'ampleur des emportements identifiés par télédétection. Éventuellement, cela permettrait de solidifier les connaissances entourant les déplacements des poussières fugitives.

4.4 Influence de la granulométrie des résidus de bauxite

En ce qui a trait à la taille des particules, il a été mentionné au début du mémoire (voir figure 3) que les rapports de forces varient selon le diamètre des résidus. Les plus grands causent une inertie plus élevée puisqu'elles subissent une plus grande force gravitationnelle. Donc, face à la force des vents, il y aurait une ségrégation des particules selon leur taille ; les plus petites voyagent plus loin par rapport à leur point d'origine. La question est de savoir comment les propriétés optiques comme l'albédo sont affectées par la taille des particules.

Une étude préliminaire avait été réalisée avec des suspensions de résidus de bauxite et un appareil UV-vis. L'idée était de suivre le signal de l'appareil à 420 nm pour des échantillons de concentrations précises. Aussi, certains d'entre eux avaient une granulométrie spécifique grâce à un tamisage préalable.

Les différentes tailles des mailles des tamis sont 20 μm , 25 μm , 32 μm , 45 μm , 63 μm et 90 μm . Puis, avec des fioles jaugées, des suspensions aqueuses de résidus de bauxite avaient été préparées avec diverses concentrations. Celles-ci sont exprimées en g/L, soit la masse de résidus par unité de volume du mélange.

Ensuite, une portion d'un échantillon est récoltée dans la cellule (1 cm^3) de l'appareil UV-vis. La suspension est vigoureusement brassée avant le transfert, tout comme la cellule avant la prise de mesure. En effet, la sédimentation progressait à vue d'œil. Pourtant, la variance entre les réplicats était très faible, même pour différentes portions d'une même suspension.

Au préalable, l'instrument doit être étalonné avec de l'eau distillée contenue dans une cellule jumelle. Puis, sa mesure d'absorbance de la suspension d'intérêt est donnée dans un spectre UV-vis. Un exemple de spectre est montré à la figure 47.

L'absence de pics majeurs dans le signal laisse supposer que le phénomène d'extinction principal est la diffusion plutôt que l'absorbance. La raison est que la diffusion survient pour toutes les longueurs d'onde, alors que l'absorbance est plus forte pour certaines des longueurs d'onde spécifiques (comme vu à la figure 17).

Dans le chapitre de la théorie, le modèle de Mie avait été soulevé. Le coefficient $Q_{\text{extinction}}$ (38) avait été défini comme l'extinction (de la diffusion et de l'absorbance) pour une surface. Plus important, $Q_{\text{extinction}}$ converge à mesure que β (relation 1.8) augmente au-delà de 1 (16).

Sachant que la longueur d'onde étudiée est 420 nm, et que les rayons varient entre 20 μm et 90 μm , β se situe entre 299 et 1346. C'est largement suffisant pour considérer que, à surface égale, l'extinction devrait être équivalente pour ces différentes tailles de particules.

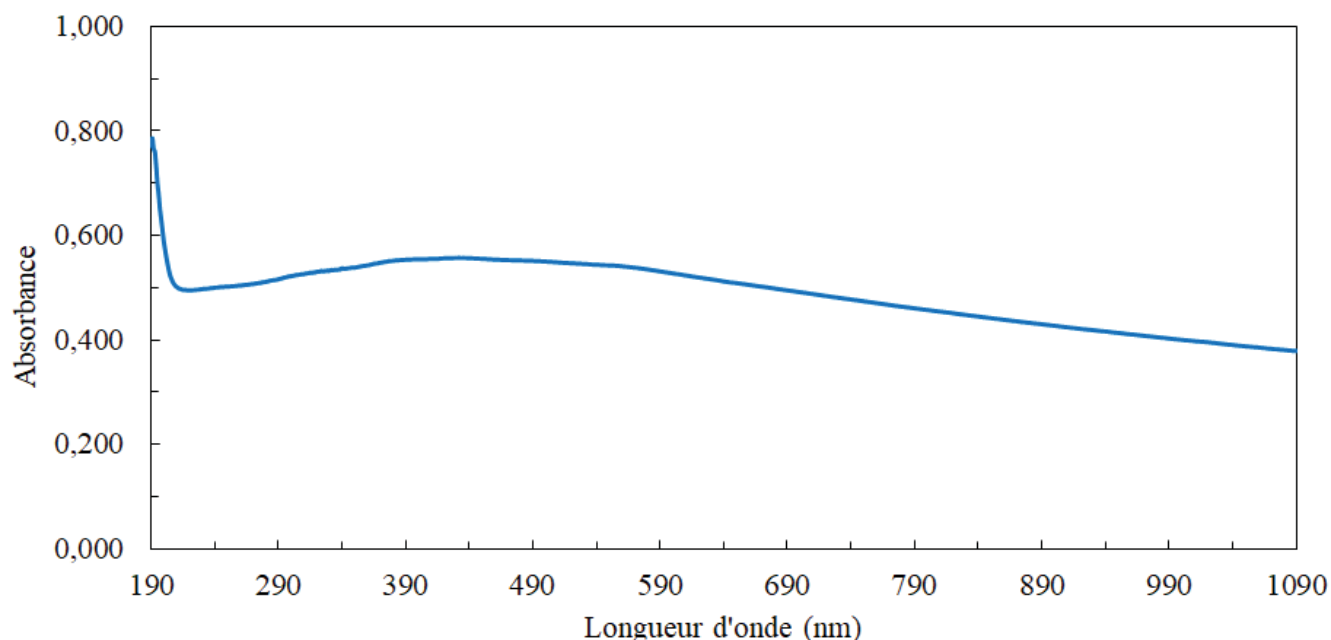


Figure 47. Spectre UV-vis d'une suspension aqueuse de résidus de bauxite (sans tamisage) à 1200 g/L

Bref, les absorbances de plusieurs échantillons de tailles et concentrations différentes ont été étudiées. D'abord, l'absorbance mesurée à 420 nm est mise en relation à leur concentration massique en g/L. Dans la figure 48, il y a une corrélation linéaire évidente ($R^2 > 0,99$) pour chaque type de granulométrie. Aussi, plus la plage de tailles est élevée, moins le taux de variation est important. C'est-à-dire, il faudrait une plus grande quantité de résidus entre 63-90 μm pour atteindre la même absorbance qu'une plus petite quantité de résidus entre 20-25 μm aurait.

Puis, en connaissant la granulométrie des échantillons, leur concentration massique et leur densité ($2,5 \pm 0,7 \text{ g/cm}^3$ pour les résidus de bauxite), il est possible de calculer le nombre de particules ou leur aire totale. Dans ce contexte, l'aire totale est la surface occupée par les résidus s'ils étaient déposés en une forme planaire de particules uniques.

La figure 49 exprime les derniers résultats par rapport au nombre de particules. Les relations restent très linéaires (les R^2 sont identiques à ceux de la dernière figure) et l'absorbance dépend encore de la granulométrie. Par contre, la tendance s'est inversée ; il faut un plus grand nombre de petites particules (20-25 μm) pour égaler l'absorbance d'un plus petit nombre de particules plus grosses (63-90 μm). L'explication est qu'à nombre égal, les plus gros diamètres prennent plus de place et provoquent plus d'extinction du rayon lumineux.

Enfin, les résultats sont exprimés en fonction de l'aire de surface projetée par les échantillons (voir figure 50). Cette fois-ci, l'absorbance est directement proportionnelle à l'aire totale. Les différents types de

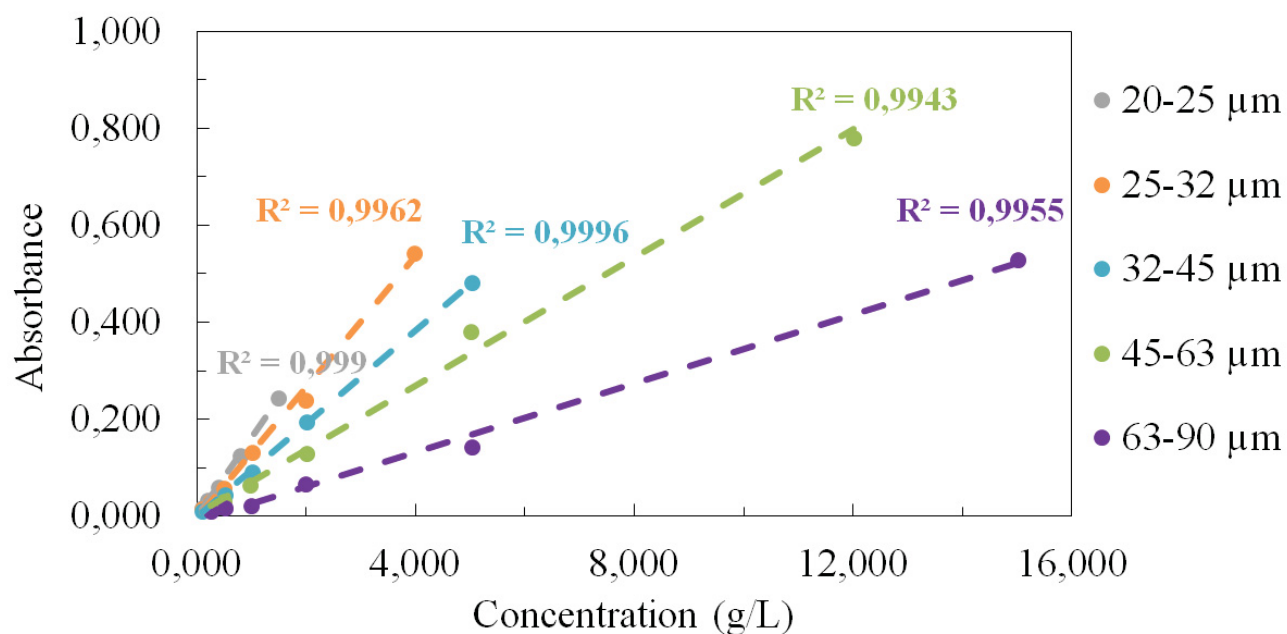


Figure 48. Absorbance UV-vis (420 nm) pour différentes granulométries de résidus de bauxite en fonction de leur concentration massique dans l'eau

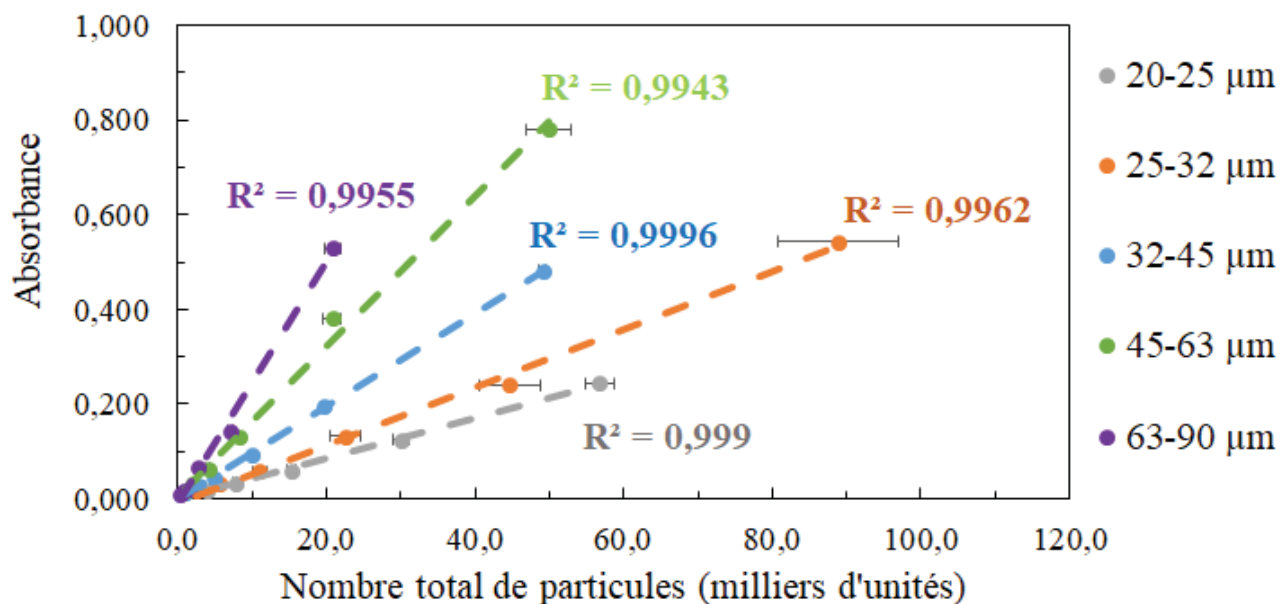


Figure 49. Absorbance UV-vis (420 nm) pour différentes granulométries de résidus de bauxite en fonction du nombre total de particules en suspension dans l'eau

granulométrie produisent la même absorbance si leur aire est similaire. Une courbe de tendance globale a été tracée. Elle prend en compte les points de tous les échantillons. Son R^2 est de 0,9591 ce qui est assez élevé pour affirmer qu'il y a une corrélation.

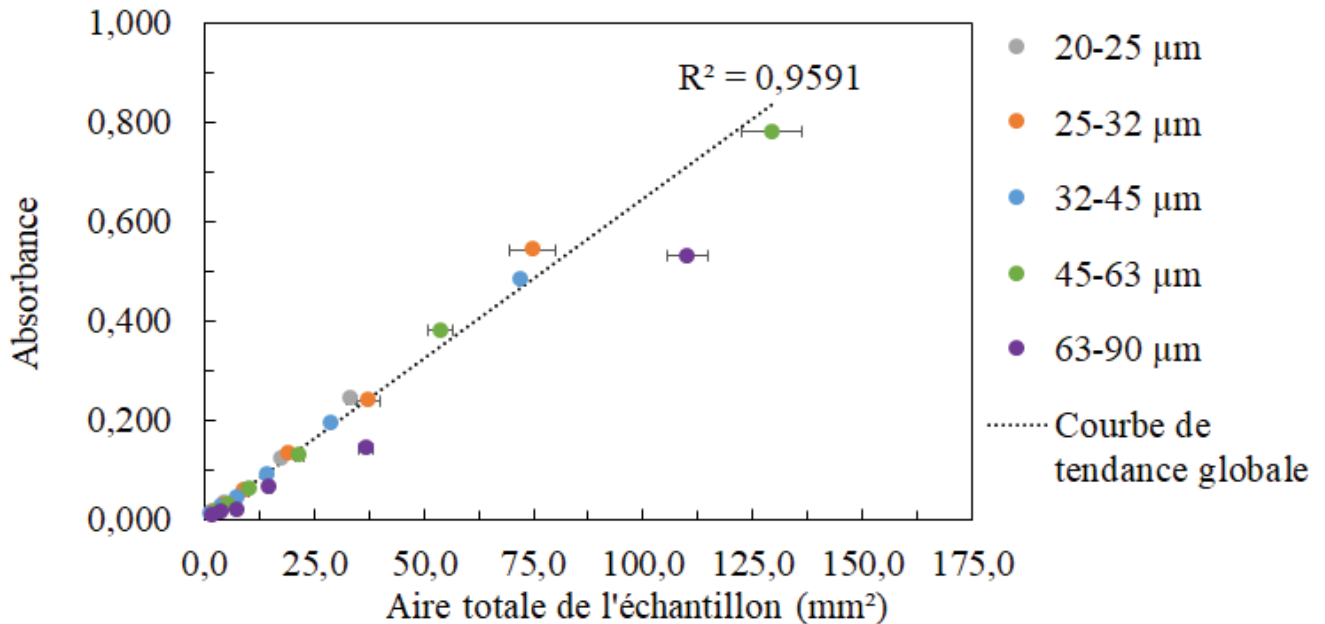


Figure 50. Absorbance UV-vis (420 nm) pour différentes granulométries de résidus de bauxite en fonction de l'aire totale des résidus dans l'eau

Ces résultats confirment que les résidus de bauxite, dans le domaine microscopique, ont un $Q_{\text{extinction}}$ qui ne dépend plus de la taille des particules. Cela dit, revenant à la figure 48, les résultats démontrent qu'à concentration massique égale, l'extinction était plus grande si la taille des particules est faible. L'explication est qu'une particule individuelle projette une aire inférieure à une population de plus petites particules (en supposant que le volume de l'individu est égal à celui de la population).

Donc, il serait possible que l'albédo de la neige contaminée diminue plus rapidement pour des poussières fines que pour des résidus grossiers. Ceci pourrait être une cause d'erreur qui explique les dissimilitudes rencontrées dans le tableau 10 de la section précédente. Les perspectives du projet pourraient explorer l'effet de la granulométrie sur l'albédo des couverts nivaux.

Conclusion

Résumé des discussions du mémoire et perspectives pour la télédétection

Deux méthodes spectroscopiques dans le spectre visible et en proche IR ont été développées pour démontrer leur utilité comme outils de gestions de sites de disposition de résidus miniers. La première permet d'évaluer les taux de siccité dans les résidus de bauxite humides ou congelés. L'albédo relatif, soit le ratio d'albédo à une bande d'absorbance IR de l'eau par rapport à l'albédo d'une référence (1250 nm), est considéré pour correctement évaluer l'extinction du signal par l'eau. Cette méthode a démontré une bonne corrélation (R^2 de 0,9685 ; 0,9946 ; 0,9814 et 0,9836) entre l'albédo et les taux de siccité des résidus de bauxite (figure 31).

Par contre, les analyses des résidus des régressions (figures 51a, 51b, 52a, 52b) démontrent que les relations ne sont pas parfaitement linéaires entre 45% et 100% de taux de siccité. Pour cela, une plage d'étalonnage plus petite permettrait d'obtenir une régression plus linéaire. Cela est important pour la construction d'un indice de risque qui prend en compte les taux de siccité des résidus miniers pour déterminer le danger d'emportement des poussières.

Néanmoins, les informations complémentaires qui peuvent être tirées des spectres d'albédo donnent des avantages certains pour la spectroscopie. Par exemple, il a été soulevé que les résidus de bauxite congelés avaient une morphologie différente selon leur taux de siccité. Lorsque leur quantité d'eau est assez élevée, ils devenaient solides et compacts et les bandes d'absorption dans l'IR proche se décalaient de quelques nm (tableau 4). Comme ce léger décalage est un signe que les résidus deviennent congelés, permettant leur rétention au sol, c'est un paramètre intéressant à suivre.

Mieux encore, comparativement à la technique gravimétrique, la spectroscopie n'inspecte que la surface des sols (figure 36 et 37). Cela en fait un outil intéressant puisque la surface est exposée à des conditions différentes que l'intérieur (le *bulk*). La gravimétrie reste une procédure de routine nécessaire pour déterminer le statut de l'ensemble d'un secteur dans un site de disposition, mais elle pourrait avoir de la difficulté à correctement estimer celui de la surface seulement.

Puis, la deuxième méthode développée inspecte la relation entre l'albédo de couverts nivaux et leurs teneurs en résidus de bauxite. Le degré d'extinction était non linéaire par rapport à cette teneur. Pour mieux cerner cette relation, un modèle empirique inverse et un modèle exponentiel décroissant furent proposés (figure 43a). Les deux modèles sont aptes à décrire la dépendance de l'albédo aux degrés de

contaminations de la neige, mais c'est le modèle inverse qui représente le mieux cette dépendance. De plus, le modèle TARTES de Libois *et al* (44) (45) corroborait aussi les résultats expérimentaux pour les faibles teneurs entre 0 et 10 mg/g de résidus dans la neige.

Bref, ce qui est important de retenir de cette relation est que l'albédo chute très rapidement avec l'ajout d'une quantité relativement faible de résidus de bauxite. Pour les droites d'étalonnage, pour un régime faible en teneur de résidus, cela veut dire que la moindre augmentation de la teneur se traduit par une grande diminution d'albédo. Donc, il est plutôt difficile de correctement estimer la teneur en résidus miniers des couverts nivaux.

Cela dit, l'estimation exacte des teneurs n'est pas nécessaire. Puisque même une petite quantité de poussières dans la neige peut affecter sa qualité visuelle (figure 25), il est même souhaitable que l'albédo soit aussi sensible aux emportements de poussières. Sous cette optique, la limite de détection (LOD) et la limite de quantification (LOQ) ont été déterminées (tableau 9). La LOD a été définie comme la plus petite teneur qui a provoqué une extinction mesurable de l'albédo soit 0,005 mg/g. La LOQ a été définie comme la plus petite valeur positive de teneur calculée soit 0,1 mg/g.

Enfin, la méthode développée pour les couverts nivaux utilisait des résidus de bauxite standards sans granulométrie particulière. Or, les emportements favorisent les fines poussières. Donc la plage de taille des particules retrouvées après un emportement pourrait être plus mince que celle utilisée pour l'étalonnage. Puis, des travaux préliminaires ont démontré que le diamètre des résidus de bauxite en suspension affectait leur extinction dans une cellule en UV-vis pour des concentrations massiques équivalentes (figure 48). L'effet de la taille des particules, pour les mesures avec la deuxième méthode développée, n'a pas été évalué.

Pour terminer, les méthodes spectroscopiques développées en laboratoire puis testées sur le terrain sont le premier pas de leur application pratique. Elles pourraient par la suite être adaptées pour la télédétection. Pour cela, il serait nécessaire d'avoir une tour, un drone ou un satellite capable de couvrir les sites de disposition de résidus de bauxite. Ces outils doivent pouvoir analyser l'albédo aux longueurs d'onde pertinentes, soit dans le proche IR et dans le visible pour respectivement suivre les taux de siccité et les emportements de poussières fugitives en conditions hivernales.

Des exemples de la littérature de l'utilisation de satellites sont donnés dans (50) et (51). On y discute aussi de leur résolution spatiale, leur fréquence de passage et leur disponibilité.

Armé d'outils de télédétection, il serait possible de cartographier des zones et d'observer les taux de siccité des résidus ou les déplacements des poussières. S'il est possible d'évaluer l'évolution, au cours des saisons, de ces paramètres, cela pourrait donner naissance à des perspectives de recherches intéressantes. En effet, avec l'aide de capteurs environnementaux autonomes, on pourrait étudier le comportement, à

grande échelle, des résidus de bauxite face aux événements météorologiques.

Éventuellement, cela permettrait de mieux cerner la corrélation entre les emportements des poussières fugitives et les prévisions météorologiques. Par exemple, selon le taux de siccité évalué à un moment donné, quelle serait la force nécessaire aux vents pour déplacer les résidus ? Ou bien, suite à une précipitation d'eau, quelle a été la variation de leur taux de siccité ?

Il serait intéressant de voir les phénomènes émergents, imprévisibles avec seulement des connaissances provenant du laboratoire, qui découleraient des études accomplies par télédétection.

Annexe

Analyses des résidus des régressions dans les figures 29, 30, 44 et 45

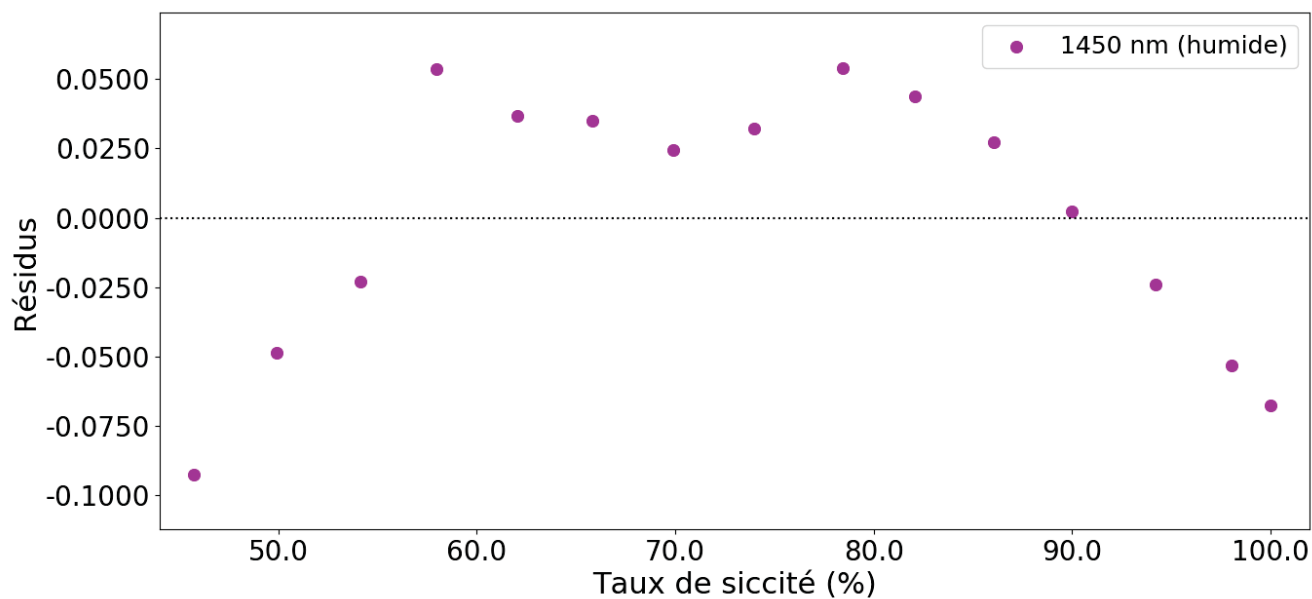


Figure 51a. Analyse des résidus de la régression à 1450 nm de la figure 29

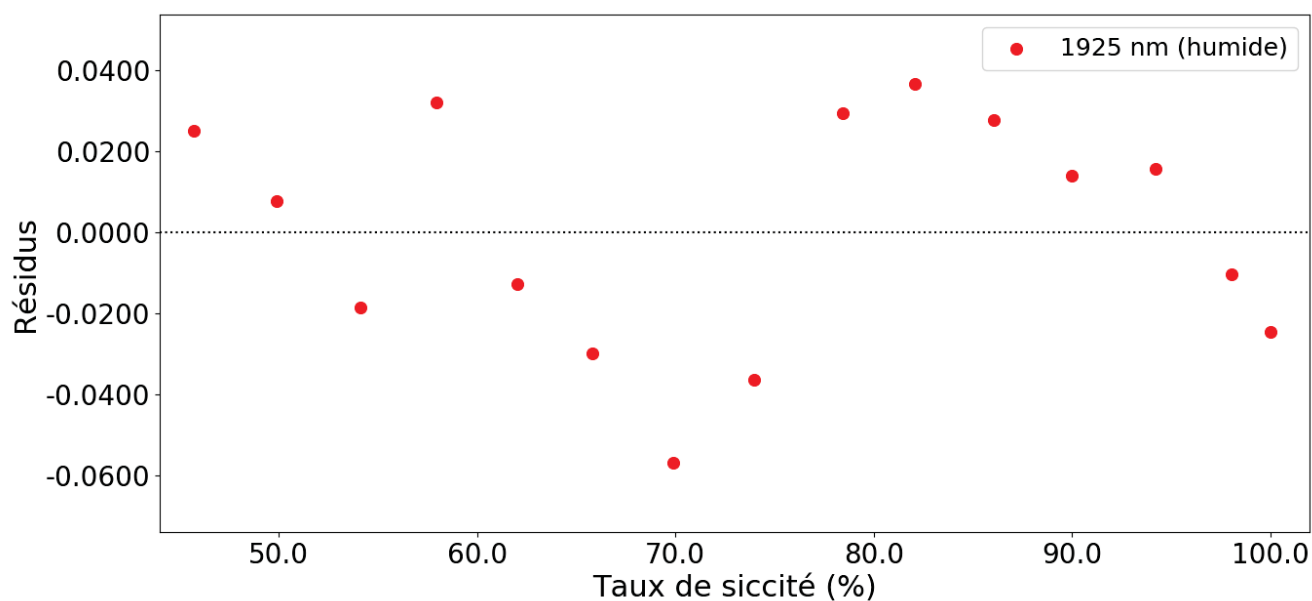


Figure 51b. Analyse des résidus de la régression à 1925 nm de la figure 29

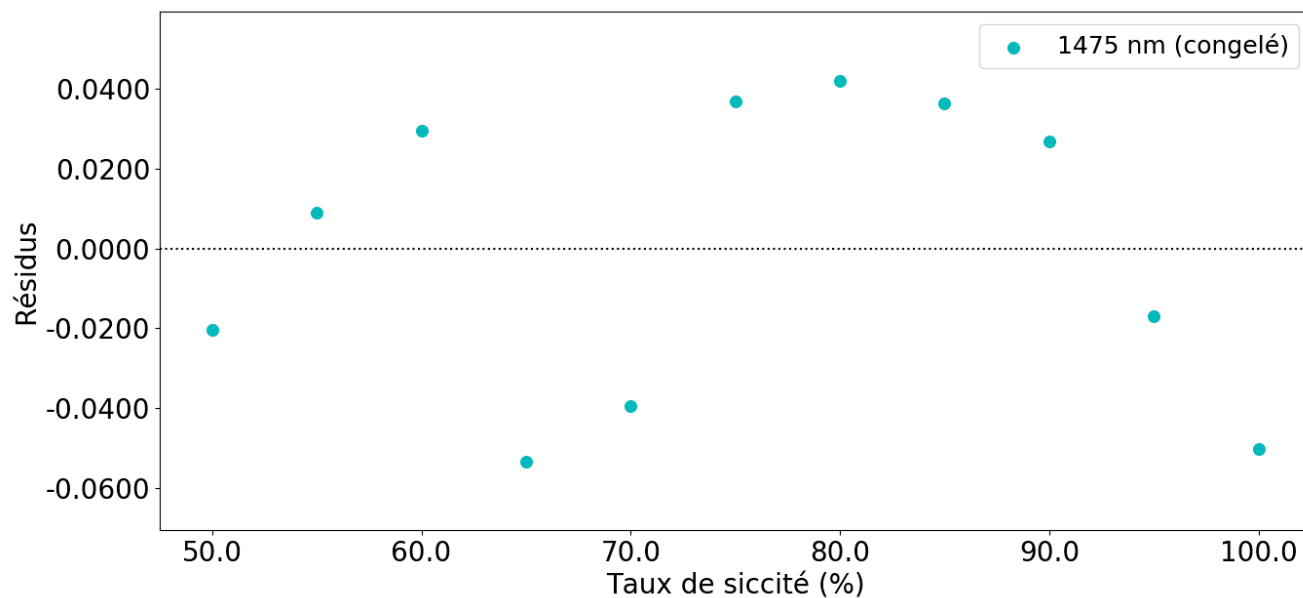


Figure 52a. Analyse des résidus de la régression à 1475 nm de la figure 30

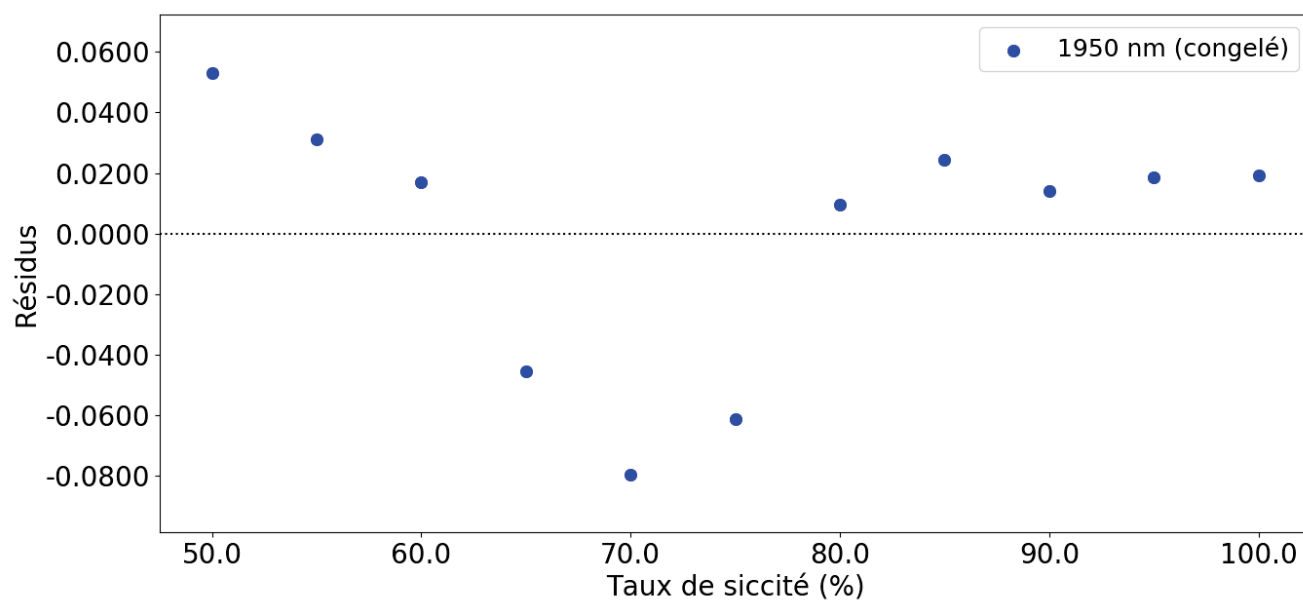


Figure 52b. Analyse des résidus de la régression à 1950 nm de la figure 30

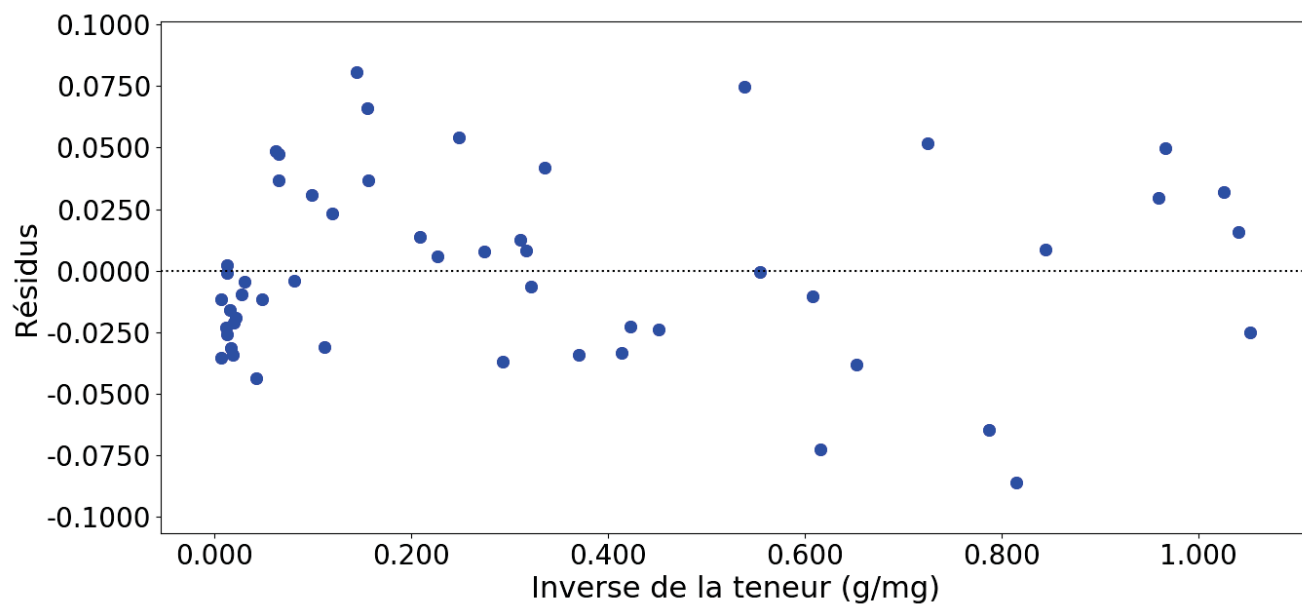


Figure 53. Analyse des résidus de la régression du modèle inverse de la figure 44

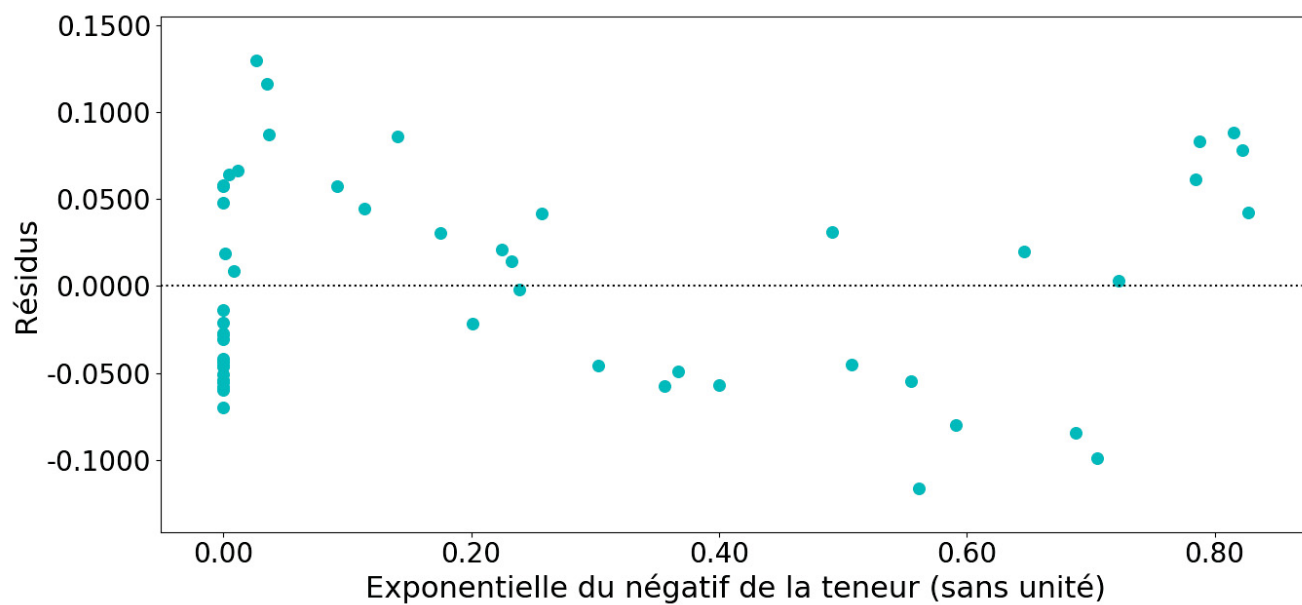


Figure 54. Analyse des résidus de la régression du modèle exponentiel décroissant de la figure 45

Détermination des paramètres des modèles empiriques de l'albédo des couverts neigeux en fonction de leur teneur en résidus de bauxite

Modèle inverse

Tableau 11. Valeurs numériques des paramètres du modèle empirique inverse (équation 4.2)

	a (mg/g)	h (mg/g)	k
Modèle inverse	$0,780 \pm 0,016$	-0,92	$0,1590 \pm 0,0073$

Les paramètres établis pour le modèle empirique inverse (équation 4.2) sont rappelés dans le tableau 11. Rappelons aussi que le modèle empirique inverse découle d'une hypothèse comme quoi l'albédo relatif de la figure 42 suivrait cette relation :

$$Albédo(c) = \frac{a}{c - h} + k \quad [A.1]$$

Avec **c** étant la teneur expérimentale en résidus de bauxite dans la neige (mg/g).

Le paramètre **h** doit être déterminé en premier. Il correspond à la teneur qui fait l'asymptote verticale et sa valeur est négative. Pour trouver **h**, il faut faire des tentatives de linéarisation de la relation A.1. Avant cela, expliquons comment la linéarisation est réalisée. Pour cela, il suffit de mettre en relation l'albédo relatif expérimental (les mêmes données de la figure 42) en fonction de l'inverse de la teneur c_{inv} selon :

$$Albédo(c_{inv}) = a c_{inv} + k \quad [A.2]$$

Où :

$$c_{inv} = \frac{1}{c - h} \quad [A.3]$$

En exprimant l'albédo en fonction de c_{inv} , un graphique à tendance linéaire peut être obtenu. Le coefficient de corrélation (R^2) de ce graphique dépend directement de la valeur **h** utilisée pour exprimer l'inverse de la teneur (équation A.3). Plus il s'approche de la valeur du tableau 11, plus le R^2 est grand.

Alors, lorsque **h** était encore inconnu, un programme computationnel a tracé plusieurs graphiques avec différentes valeurs de **h** et différents R^2 ont été obtenus. Le graphique avec la tendance linéaire optimale

avait -0,92 mg/g comme **h**. Comme il représente l'asymptote verticale, il prend les mêmes unités que l'axe. Aussi, la valeur a été arrondie à 2 chiffres significatifs pour représenter la plus petite précision de la teneur expérimentale.

Enfin, pour le paramètre **a**, en réalisant la linéarisation avec -0,92 mg/g comme valeur de **h**, la pente de cette tendance linéaire est de $(0,780 \pm 0,016)$ mg/g. Revenant à la relation A.2, la pente correspond au paramètre **a**.

Finalement, dans le même ordre d'idées le paramètre **k** correspond à l'ordonnée à l'origine, soit $0,1590 \pm 0,0073$

Modèle exponentiel décroissant

Tableau 12. Valeurs numériques des paramètres du modèle empirique exponentiel (équation 4.3)

	a	b (g/mg)	k
Modèle exponentiel décroissant	$0,732 \pm 0,025$	0,265	$0,203 \pm 0,011$

Le même principe de détermination des paramètres (tableau 12) est appliqué pour le modèle exponentiel décroissant. Rappelons que l'hypothèse, ici, est que l'albédo varierait selon :

$$Albédo(c) = a 10^{-b \times c} + k \quad [A.4]$$

Pour commencer, le paramètre **b** est déterminé. Il a été, comme pour le paramètre **h**, optimisé pour obtenir la meilleure régression linéaire. La linéarisation suit la relation suivante :

$$Albédo(c_{\text{exp}}) = a c_{\text{exp}} + k \quad [A.5]$$

Où :

$$c_{\text{exp}} = 10^{-b \times c} \quad [A.6]$$

En utilisant les données d'albédo expérimentales et la définition de c_{exp} , plusieurs graphiques ont été tracés avec différentes valeurs de **b**. Celui qui avait le plus grand R^2 avait 0,265 g/mg comme **b**.

Puis, la pente de cette régression linéaire est de $(0,732 \pm 0,025)$ ce qui représente le paramètre **a**. L'ordonnée à l'origine est de $(0,203 \pm 0,011)$ et c'est la valeur donnée pour le paramètre **k**.

Bibliographie

- (1) Grafe, M. ; Power, G. ; Klauber, C. Review of Bauxite Residue Alkalinity and Associated Chemistry. *CSIRO Document DMR-3610. Project ATF-06-3 : Management of Bauxite Residues* **2009**, 51.
- (2) Evans, K. ; Nordheim, E. ; Tsemelis, K. Bauxite Residue Management. *Light Metals* **2012**, 63-66.
- (3) Power, G. ; Gräfe, M. ; Klauber, C. Bauxite residue issues : I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy* **2011**, 108, 33-45.
- (4) Petavratzi, E. ; Kingman, S. ; Lowndes, I. Particulates from mining operations : A review of sources, effects and regulations. *Minerals Engineering* **2005**, 18, 1183-1199.
- (5) Radio_Canada De la neige rougeâtre près du Complexe Jonquière de Rio Tinto Alcan, 2013.
- (6) Maurais, J. et al. Prevention and Mitigation of Fugitive Dust Emission from Bauxite Residues : Aggravating Environmental Effects, Forecasting and Risk Assessment. *Alumina Quality Workshop (AQW)* **2018**.
- (7) Strasser, U. et al. Is snow sublimation important in the alpine water balance ? *The Cryosphere* **2008**, 53-66.
- (8) Li, H. ; Harris, S. in *9th International Alumina Quality Workshop*, 2012, p. 300-303.
- (9) Coakley, J. Reflectance and Albedo, Surface. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* **2003**, 1914-1923.
- (10) Bohren, C. F. Multiple scattering of light and some of its observable consequences. *American Journal of Physics* **1986**, 55, 524-533.
- (11) Gaffin, S. R. et al. Bright is the new black — multi-year performance of high-albedo roofs in an urban climate. *Environmental Research Letters* **2012**, 7, 1-12.
- (12) Lucey, P. G. ; et al. Neumann, G. A. The global albedo of the Moon at 1064 nm. *Journal of Geophysical Research : Planets* **2014**, 119, 1665-1679.
- (13) Dumont, M. Détermination de l'albédo des surfaces enneigées par télédétection : application à la reconstruction du bilan de masse du glacier de Saint Sorlin, thèse de doct., Paris-Est, 2010, p. 37.
- (14) Liu, Y. ; Shi, G. ; Xie, Y. Impact of Dust Aerosol on Glacial – Interglacial Climate. *Advances in Atmospheric Sciences* **2013**, 30, 1725-1731.
- (15) Dumont, M. et al. Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009. *Nature Geoscience* **2014**, 7, 509-512.
- (16) Domine, F. et al. Snow physics as relevant to snow photochemistry. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2008**, 8, 171-208.
- (17) Hind, A. R. ; Bhargava, S. K. ; Grocott, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids : a review. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* **1999**, 146, 359-374.

- (18) Zhu, F. et al. Evaluation of aggregate microstructures following natural regeneration in bauxite residue as characterized by synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. *Science of the Total Environment* **2016**, 573, 155-163.
- (19) Stuart, B. Infrared spectroscopy. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* **2015**, DOI : [10.1002/0471238961.0914061810151405.a01.pub3](https://doi.org/10.1002/0471238961.0914061810151405.a01.pub3).
- (20) Büning-Pfaue, H. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. *Food Chemistry* **2003**, 82, 107-115.
- (21) Zhou, G. X. et al. Determination and Differentiation of Surface and Bound Water in Drug Substances by Near Infrared Spectroscopy. *Journal of Pharmaceutical Sciences* **2003**, 92, 1058-1065.
- (22) Foley, W. J. et al. Ecological applications of near infrared reflectance spectroscopy - a tool for rapid, cost-effective prediction of the composition of plant and animal tissues and aspects of animal performance. *Oecologia* **1998**, 116, 293-305.
- (23) Buijs, K. ; Choppin, G. R. Near-Infrared Studies of the Structure of Water. *The Journal of Chemical Physics* **1963**, 39.
- (24) Libnau, F. O. et al. Spectra of water in the near- and mid-infrared region. *Vibrational Spectroscopy* **1994**, 7, 243-254.
- (25) Larouche, P. La structure de l'eau liquide : une étude thermique par spectroscopie infrarouge, thèse de doct., Université du Québec à Trois-Rivières, 2009.
- (26) Czarnik-Matusiewicz, B. ; Pilorz, S. ; Hawranek, J. P. Temperature-dependent water structural transitions examined by near-IR and mid-IR spectra analysed by multivariate curve resolution and two-dimensional correlation spectroscopy. **2005**.
- (27) Maeda, H. et al. Near Infrared Spectroscopy and Chemometrics Studies of Temperature-Dependent Spectral Variations of Water : Relationship between Spectral Changes and Hydrogen Bonds. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **1995**, 3.
- (28) Bohren, C. F. ; Huffman, D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* ; Willey Press : New York, 1983.
- (29) Hecht, E., *Optics*, 5^e éd. ; Pearson : 2015.
- (30) Judd, D. B. Fresnel reflection of diffusely incident light. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* **1942**, 29, 1940-1943.
- (31) Hale, G. M. ; Querry, M. R. Optical Constants of Water in the 200-nm to 200-Mm Wavelength Region. *Applied Optics* **1989**, 12, 555-563.
- (32) Warren, S. G. ; Brandt, R. E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave : A revised compilation. *Journal of Geophysical Research* **2008**, 113, 1-10.
- (33) Querry, M. R. *Optical Constants* ; rapp. tech. ; 1985.
- (34) Swinehart, D. F. The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education* **1962**, 39, 333-335.

- (35) Twomey, S. A. ; Bohren, C. F. ; Mergenthaler, J. L. Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces. *Applied Optics* **1986**, 25, 431-437.
- (36) Hahn, D. W. *Light Scattering Theory* ; rapp. tech. ; University of Florida, 2009, p. 1-13.
- (37) Berne, B. J. ; Pecora, R., *Dynamic Light Scattering with Applications to Chemistry, Biology and Physics*, Dover Publ, New York, 2000.
- (38) Senior, T. B. A. Note on the extinction efficiency. *Applied Optics* **1983**, 22, 1796-1797.
- (39) Evans, B. T. N. ; Fournier, G. R. Simple approximation to extinction efficiency valid over all size parameters. *Applied Optics* **1990**, 29.
- (40) Ferrini, R. Les enjeux du remplacement des lampes à incandescence. *Technologie éclairage* **2010**, 37-42.
- (41) Maurais, J. et al. A Thermal Imaging Methodology to Study Evaporation Kinetics in Mine Tailings. *Environmental Science Water Research & Technology* **2020**, DOI : [10.1039/D0EW00104J](https://doi.org/10.1039/D0EW00104J).
- (42) McQuarrie, D. ; Rock, P. ; Gallogly, E., *Colligatives properties of Solutions General Chemistry* ; Valley, M., éd. ; University Science Books : 2011.
- (43) Libois, Q. ; Picard, G. Two-stream Radiative TransfEr in Snow model.
- (44) Libois, Q. Scientific documentation for TARTES Radiative transfer theory.
- (45) Koh, G. *Radiative transfer in falling snow : A two-stream approximation* ; rapp. tech. ; 1989.
- (46) Coakley, J. A. The Two-Stream Approximation in Radiative Transfer : Including the Angle of the Incident Radiation. *Journal of the Atmospheric Sciences* **1974**, 32, 409-418.
- (47) Techniques for Dust Prevention and Suppression. *Washington State Department of Ecology* **2003**, 96, 1-20.
- (48) Parsons, M. L. The definition of detection limits. *Journal of Chemical Education* **1969**, 46, 290-292.
- (49) Keith, L. H. et al. Principles of Environmental Analysis. *Analytical Chemistry* **1983**, 55, 2210-2218.
- (50) He, T. et al. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS , TM , ETM + , and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment* **2018**, 204, 181-196.
- (51) Qu, Y. et al. Mapping Surface Broadband Albedo from Satellite Observations : A Review of Literatures on Algorithms and Products. *Remote Sensing* **2015**, 7, 990-1020.

